



Sandra Gomes Rodrigues

# AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DA COR NO FABRICO DE TELHAS CERÂMICAS ABORDAGEM COLORIMÉTRICA DIGITAL

Mestrado em Química

Departamento de Química

FCTUC

Junho 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Sandra Gomes Rodrigues

# **Avaliação da conformidade da cor no fabrico de telhas cerâmicas**

## **Abordagem colorimétrica digital**

**Dissertação apresentada para provas de Mestrado em Química, área de  
especialização em Controle de Qualidade e Ambiente**

Professor Doutor Jorge L. G. F. S. Costa Pereira

João J. C. B. Ginginha

**Junho 2016**

**Universidade de Coimbra**

*Ao Renato*

**«Uma imagem vale mais que mil palavras.»**

*Confúcio*

# Agradecimentos

Este projeto marca o fim desta grande jornada que é a vida de um estudante. Uma jornada de mais de 15 anos de empenho, esforço, dedicação e gratidão. Gratidão a todas as pessoas que tornaram isto possível, desde a querida Professora Fátima da escola primária, até todas as pessoas que se cruzaram comigo neste último ano. Foi, sem dúvida, um ano rico em experiências, não podendo deixar passar em vão as pessoas que tornaram este projeto, o meu (nosso) grande projeto.

Ao Professor Doutor Jorge Costa Pereira pela orientação nestes três últimos anos. Obrigada pela disponibilidade, paciência, persistência e acima de tudo, por todos os ensinamentos. Foi, sem dúvida, a bússola deste percurso que se mostrava incerto.

Ao João Ginginha e à Catarina Costa por permitirem que o meu percurso profissional começasse na Umbelino Monteiro. Obrigada por toda a orientação, disponibilidade e amizade com que me acolheram.

À Sandrina por me acolher no seu espaço. Por me ensinar tudo sobre os ensaios no laboratório, por me deixar errar e continuar com um sorriso.

Ao João Carlos pela companhia de laboratório, por todos os ensinamentos sobre as telhas e os engobes e pelas conversas e lições de vida de final do dia.

Às meninas da hora do almoço, muito obrigada pela companhia, pela simpatia e pela amizade. Certamente nos cruzaremos por aí, numa caminhada qualquer.

Ao Departamento de Marketing pela disponibilização das fotografias que enriqueceram este trabalho.

A todos os colaboradores da UM um sincero obrigada, por disponibilizarem um tempinho das suas horas de trabalho para me ajudarem a compreender todo o funcionamento da empresa. Um especial obrigada ao meu Painel de Avaliação, por todos os minutos que passaram à volta das “minhas telhas”.

Obrigada a toda a minha família, que nunca desistiu de mim e acreditou nas minhas capacidades.

À minha irmã, obrigada pelo empréstimo do carro para poder ir trabalhar. Sabes bem que ele esteve em boas mãos.

Aos meus pais que me educaram da melhor maneira, preparando-me para a “vida lá fora”, respeitando e apoiando todas as minhas escolhas.

Ao Renato, um obrigada do tamanho do mundo. Por todas as vezes que me levantaste quando caí, por todos os dias em que eu falava sempre na mesma coisa, por oito anos de confiança, amor e carinho.

A todas as amigas que Coimbra me deu a conhecer, mil obrigadas.  
A Coimbra.

*«Amo-te com a força de quem não te quer ver partir»*

# Objetivos

Estando este Projeto de Mestrado inserido no âmbito do Controlo da Qualidade, desde o seu início que se pretendia desenvolver um trabalho inovador que, de alguma forma, auxiliasse o desempenho ou resolvesse alguma situação problemática inerente ao funcionamento da Umbelino Monteiro, S.A. (UM).

Inicialmente, pretendia-se, através da análise multivariada, identificar as variáveis do processo que mais influenciavam o produto final, de maneira a otimizar a produção fabril.

No entanto, durante o estágio na empresa, foi possível detetar que grande parte das reclamações que lhe chegam deve-se à não conformidade da cor das telhas e dos acessórios.

Na UM, bem como na maioria das empresas ligadas à indústria cerâmica, o controlo da tonalidade faz-se apenas por inspeção visual, o que requer a existência de pessoas qualificadas para o efeito, que desenvolveram essa capacidade com a experiência de anos de trabalho. Contudo, este tipo de avaliação está dependente da atenção com que cada avaliador desempenha esta tarefa exigente, uma vez que é necessário acompanhar todo o trabalho contínuo dos turnos de produção.

Além disso, a avaliação da conformidade da cor, sendo uma capacidade dependente da visão e da perceção de cor de cada indivíduo, pode ser falseada por critérios pessoais e circunstanciais.

Nesse sentido, para facilitar a deteção de não conformidades pensou-se em criar uma ferramenta inovadora que permitisse quantificar a cor e, deste modo, verificar a sua conformidade com padrões cromáticos internos. Esta ferramenta teria de ser coerente, relativamente fácil de utilizar e suficientemente automática ao ponto de poder ser usada sem a supervisão humana.

Tendo a noção de que a imagem digital permite quantificar a cor de modo simples e pouco oneroso, enveredou-se pela utilização de uma máquina fotográfica digital para a aquisição da imagem em condições controladas, e desenvolveram-se diversos algoritmos de tratamento da imagem e quantificação sob a forma de rotinas de análise de conformidade.

Deste modo foram criados processos coerentes e fiáveis de avaliação da conformidade da cor nas peças fabricadas.

# Resumo

Ao longo dos primeiros meses de estágio na Umbelino Monteiro, S.A. (UM), foi possível acompanhar o funcionamento da unidade fabril, bem como participar em todo o trabalho de controlo de qualidade que ali se realiza, desde a receção de matérias primas até ao controlo das paletes em pré-parque, passando pelos diversos ensaios contidos no plano de inspeção e ensaios da UM.

Durante o estágio, observou-se que um elevado número de reclamações que chegavam à empresa estava relacionado com a falta de conformidade da cor. Para contrariar essa situação, começamo-nos a focar na criação de uma ferramenta de processamento de imagem que permitisse a deteção de anomalias cromáticas das telhas. Esta ferramenta, inovadora na área da cerâmica, consiste num sistema de captura de imagem digital seguido de um tratamento numérico com algoritmos desenvolvidos em Octave/Matlab para a obtenção do grau de conformidade da cor.

Numa fase inicial, foi necessário desenvolver condições adequadas à aquisição da imagem, no sentido de manter a fiabilidade e reprodutibilidade do sistema. Houve a preocupação de avaliar fontes de variabilidade e de interferência relacionados com a iluminação, bem como o modo de aquisição da imagem a partir da câmara digital.

Como sistema final, a melhor opção consistiu no desenvolvimento de um sistema invariante e com geometria bem definida (caixa equipada com duas lâmpadas fluorescentes dispostas paralelamente, mantendo constante a distância do objeto à lente da câmara), a utilização de uma máquina digital de boa qualidade programada para funcionar em modo manual e a colocação de referências cromáticas no campo de visão, que permitem a correção da iluminação.

Deste modo, através da imagem de uma telha é possível determinar as suas coordenadas cromáticas, o seu perfil histográfico e a sua cor RAL aproximada.

Começou-se, então, por recolher telhas de diversos modelos e cores, cujas tonalidades são consideradas conformes e, com isso, foi formado um conjunto de telhas padrão, que foi caracterizado ao nível da cor.

Esta ferramenta tem como objetivo final a caracterização e avaliação da conformidade da cor das telhas em produção, de modo a minimizar os erros de avaliação dos humanos. Para avaliar a sua eficácia, foram ainda realizados ensaios de controlo da tonalidade ao longo de dois meses de produção.

Posteriormente, esta ferramenta poderá ser utilizada por pessoas não qualificadas ou ser inserida na linha de produção, permitindo comparar a cor das telhas produzidas (1) com o padrão, (2) entre produções diferentes ou (3) com os acessórios produzidos, impedindo que seja vendido material não conforme.

## Palavras-chave:

cerâmica, telhas, processamento digital de imagem, octave, matlab, conformidade cromática

# Abstract

Over the first months of internship at Umbelino Monteiro, S.A. (UM), it was possible to observe the factory's operation, as well as participate in all quality control work that is done, from the receipt of raw materials to the pallet's control, through the various essays in the UM's inspection plan.

During the internship, it was observed that a large number of complaints that reached the company was related to the lack of color conformity. To counter this situation, we started to focus on creating an image processing tool that allow the detection of rooftile's chromatic defects. This tool, innovative in the ceramics field, is a image capturing system, followed by algorithms developed in Octave.

Initially, it was necessary to develop suitable conditions for image acquisition, in order to keep the system reliability and reproducibility. There was a concern to evaluate sources of variability and interference related to lighting, as well as the image acquisition mode from the digital camera.

For the final system, the best option was to develop an invariant system with well defined geometry (box fitted with two paralel fluorescent lamps, keeping constant the distance between object and camera lens), using a good quality digital camera programmed to operate in manual mode and the placement of chromatic references in the field of vision, allowing for the correction of lighting.

Through a rooftile's image, it is possible to determine the chromaticity coordinates, the chromatic histogram and the aproximate RAL color.

The work started with the collecting of rooftiles of diferent designs and colors, which shades are considered compliant and, therefore, has formed a set of standard rooftiles, which was characterized in terms of color.

This tool has the ultimate goal of characterization and assessment of rooftile's color conformity in order to minimize the human errors. To assess their effectiveness, it was also carried out tone control tests over two months of production.

Later, this tool can be used by unqualified people or be inserted into the production line, allowing to compare the color of the produced rooftiles (1) with the standard, (2) between different productions or (3) with the produced acessories, preventing the sale of nonconforming material.

## Keywords:

ceramics, rooftiles, digital image processing, octave, matlab, color conformity



# Preâmbulo

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. No **Capítulo 1** é feita uma contextualização histórica da cerâmica, da telha e da empresa Umbelino Monteiro, S.A., local onde foi realizado o estágio. São ainda abordados alguns aspetos sobre o controlo de qualidade e o processamento de imagem.

Os fundamentos do projeto estão descritos no **Capítulo 2**, englobando toda a temática da produção de cerâmica na UM, bem como o comportamento químico da argila. É feita uma descrição das etapas do processamento de imagem e a sua revisão bibliográfica, bem como a descrição dos testes estatísticos essenciais para este trabalho e algumas ferramentas básicas da qualidade.

O **Capítulo 3** refere-se à parte experimental, descrevendo a metodologia adotada para alcançar os objetivos propostos.

A análise e discussão dos resultados obtidos podem ser encontrados no **Capítulo 4**.

O **Capítulo 5** apresenta uma síntese conclusiva dos resultados.

No sentido de simplificar o processo de transferência de informação entre o *Octave/Matlab* (ambiente de programação) e o *LYX* (processador de texto), a notação dos números reais foi simplificada através da substituição da vírgula "," pelo ponto "." como símbolo representativo do separador decimal.

Atendendo a que na avaliação da conformidade cromática se procura, de uma forma robusta, comparar os histogramas de índice de cor, a palavra “*match*” foi utilizada com o sentido de conformidade cromática, resultante da sobreposição dos histogramas cromáticos normalizados.

Por uma questão de confidencialidade, alguns valores numéricos relacionados com o processo de fabrico da empresa são apresentados sob a forma de percentagem e não são apresentados grafismos relacionados com os mesmos.

# Nomenclatura

$B$	Plano cromático azul (do inglês, Blue)
$G$	Plano cromático verde (do inglês, Green)
$H_0$	Hipótese nula
$H_1$	Hipótese alternativa
$p(B)$	Sobreposição relativa do plano cromático azul
$p(G)$	Sobreposição relativa do plano cromático verde
$p(R)$	Sobreposição relativa do plano cromático vermelho
$p(RGB)$	Sobreposição relativa global
$p[H_0]$	Valor de prova
$R$	Plano cromático vermelho (do inglês, Red)
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
a.C.	antes de Cristo
ADV	Gama Advance Premium
ANOVA	Análise de variância (do inglês, ANalysis Of VARIance)
CIE	Comissão Internacional de Iluminação (do francês, Comission Internationale d'Eclairage)
CMY	Modelo cromático que faz uso das componentes cromáticas Ciano, Magenta e Amarelo (do inglês, Cyan, Magenta, Yellow)
CMYK	Modelo cromático que faz uso das componentes cromáticas Ciano, Magenta, Amarelo e Preto (do inglês, Cyan, Magenta, Yellow, Black(Key))
GIMP	GNU Image Manipulation Program, software gráfico
HCA	Análise Hierárquica de Agrupamentos (do inglês, Hierarchical Cluster Analysis)

L*a*b*	Modelo cromático que faz uso das componentes de luminosidade e de cromaticidade separadamente
NIST	Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (do inglês, National Institute of Standards and Technology)
pdf	Função densidade de probabilidade (do inglês, probability density function)
RGB	Modelo cromático que faz uso das componentes cromáticas Vermelho, Verde e Azul (do inglês, Red, Green, Blue).
SGI	Sistema de Gestão Integrado
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
TAC	Tomografia Axial Computorizada
TV	Valor do teste
UM	Umbelino Monteiro, S.A.
UV/Vis	Radiação electromagnética da região Ultravioleta/Visível

# Legislação

NP EN 1304	Norma portuguesa que define as especificações das Telhas Cerâmicas e Acessórios
NP EN ISO 14001	Norma portuguesa que define os requisitos e as linhas de orientação dos Sistemas de Gestão Ambiental
NP EN ISO 9001	Norma portuguesa que define os requisitos dos Sistemas de Gestão da Qualidade
NP 4397	Norma portuguesa que define as especificações dos Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde no Trabalho
OHSAS 18000	Norma internacional que define as especificações dos Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde no Trabalho

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Da origem da indústria cerâmica à Umbelino Monteiro, S.A. . . . .	1
1.1.1	Origem da indústria cerâmica . . . . .	1
1.1.2	A origem da telha cerâmica . . . . .	2
1.1.3	A Umbelino Monteiro, S.A. . . . .	3
1.2	Inspeção e controlo da qualidade . . . . .	4
1.3	A origem do processamento de imagem digital . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Fundamentação</b>	<b>11</b>
2.1	Argila . . . . .	11
2.1.1	Composição química da argila . . . . .	12
2.1.2	Efeito do calor nas argilas . . . . .	15
2.2	Processo de fabrico da telha cerâmica na Umbelino Monteiro . . . . .	17
2.2.1	Telha UM Lusa . . . . .	20
2.2.2	Telha Advance Premium Lusa . . . . .	20
2.3	Luz e cor . . . . .	22
2.4	Estrutura do olho humano . . . . .	23
2.5	Modelos cromáticos . . . . .	26
2.5.1	Modelo RGB . . . . .	26
2.5.2	Modelos CMY e CMYK . . . . .	27
2.5.3	Modelo HSV . . . . .	28
2.5.4	Modelo $L^*a^*b^*$ . . . . .	28
2.6	Sistema de cores RAL . . . . .	29
2.7	Imagem digital . . . . .	32
2.8	Histograma de imagem digital . . . . .	34
2.9	Etapas do processamento digital de imagens . . . . .	35
2.10	Estado da Arte . . . . .	39
2.11	Tratamento estatístico de dados . . . . .	43
2.11.1	Ferramentas da Qualidade . . . . .	43
2.11.2	Testes estatísticos . . . . .	47
2.11.3	Análise de agrupamentos . . . . .	51

<b>3</b>	<b>Metodologia Experimental</b>	<b>55</b>
3.1	Materiais e Métodos . . . . .	55
3.1.1	Sistema de iluminação e captura de imagem . . . . .	55
3.1.2	Pré-processamento . . . . .	56
3.1.3	Segmentação . . . . .	56
3.1.4	Extração de características . . . . .	57
3.2	Ensaio . . . . .	58
3.2.1	Ensaio preliminar . . . . .	58
3.2.2	Avaliação da homogeneidade da iluminação . . . . .	58
3.2.3	Caracterização cromática das telhas . . . . .	59
3.2.4	Determinação da cor RAL das telhas . . . . .	59
3.2.5	Visão humana vs. processamento digital de imagens . . . . .	59
3.2.6	Coerência da cor obtida por simulação . . . . .	60
3.2.7	Avaliação das variações de cor provocadas pelo forno . . . . .	60
3.2.8	Avaliação diária da cor . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>63</b>
4.1	Ensaio preliminar . . . . .	63
4.2	Avaliação da homogeneidade da iluminação . . . . .	65
4.3	Caracterização cromática das telhas . . . . .	71
4.4	Determinação da cor RAL das telhas . . . . .	75
4.5	Visão humana vs. processamento digital de imagens . . . . .	77
4.6	Coerência da cor obtida por simulação . . . . .	84
4.7	Avaliação das variações de cor provocadas pelo forno . . . . .	86
4.8	Avaliação diária da cor . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>91</b>
<b>A</b>	<b>Tabelas Estatísticas</b>	<b>99</b>
<b>B</b>	<b>Algoritmos</b>	<b>101</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo faz-se uma contextualização histórica da indústria cerâmica e da telha cerâmica, bem como uma breve apresentação sobre a empresa Umbelino Monteiro, S.A. (UM), onde foi desenvolvido o projeto.

Para além disso, é abordada a origem do Controlo de Qualidade, bem como a importância do Sistema de Gestão de Qualidade.

Este capítulo termina com uma explicação sobre a origem do processamento digital de imagens.

### 1.1 Da origem da indústria cerâmica à Umbelino Monteiro, S.A.

A palavra "cerâmica" provém do termo grego *keramiké*, derivação de *keramos*, que significa argila, a matéria-prima da cerâmica.

A argila é uma rocha constituída por grãos de dimensões muito reduzidas. É um produto da alteração de rochas silicatadas, sendo uma mistura de vários minerais: caulinite<sup>1</sup>, ilite<sup>2</sup> e montemorilonite<sup>3</sup>, por exemplo. As suas principais características são a sua coerência, a sua secura e o seu estado plástico quando em contacto com a água.

#### 1.1.1 Origem da indústria cerâmica

Sendo uma das atividades mais antigas usada no fabrico de utensílios e produtos utilizados na construção, no ornamento, no armazenamento e no transporte de produtos, calcula-se que o barro vermelho já tivesse sido explorado no período Neolítico, logo após a descoberta do fogo. Nessa altura, o Homem aprendeu que o calor fixava a forma dos materiais terrosos e tornava-os mais estáveis à água. Os antigos produtores de tijolos cerâmicos queimados descobriram que as argilas tinham propriedades diferentes e que cada produto teria de ser fabricado com um tipo específico de argila [1, 2].

Tendencialmente, a história da cerâmica está interligada com a história da civilização. A cerâmica prosperou entre quase todas as civilizações ao mesmo tempo, estando o ambiente e a cultura dos diversos povos refletidos nas formas e nas cores.

---

<sup>1</sup> $(Si_2Al_2O_5(OH)_4)$

<sup>2</sup> $((K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)])$

<sup>3</sup> $(Na, Ca)_{0.33}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$

No ano de 4000 a.C., os Assírios já obtinham cerâmica vidrada, através da utilização de barros com pontos de fusão mais baixos [3].

No fim da Idade da Pedra, iniciou-se a cozedura da argila em fornos, conferindo mais resistência às peças, permitindo a sua utilização em projetos mais arrojados, como a famosa Torre de Babel, a grande muralha da China e a inscrição dos primeiros hieróglifos em placas de argila [2].

No século VII, os chineses já fabricavam porcelana, enquanto no resto do mundo ainda era apenas produzida cerâmica vermelha. No século seguinte, a loiça branca surge na Inglaterra.

Enquanto os Egípcios e os Gregos mal utilizavam o tijolo, os Romanos dominavam esta indústria, levando os seus conhecimentos a todas as partes do mundo. Por outro lado, os Árabes revalorizaram de maneira extraordinária este material, de tal forma que o seu uso é característico da arquitetura muçulmana [3].

### 1.1.2 A origem da telha cerâmica

A origem das coberturas com telhas cerâmicas é incerta. Inicialmente, os primórdios construíam habitações precárias para se protegerem dos agentes atmosféricos desfavoráveis. Com a domesticação de animais, o cultivo de terras e a utilização do fogo, o Homem foi levado a criar estruturas de apoio para estas novas atividades [4].

As primeiras coberturas pré-históricas eram feitas com materiais perecíveis como o colmo, a casca de árvores, folhas e peles de animais [4,5]. O Homem tentou sempre encontrar materiais que o pudessem proteger eficazmente contra os elementos da natureza.

A invenção das telhas atribui-se a Kiniras, rei de Chipre, mas é possível que os Assírios já as tivessem descoberto muito antes [2]. De facto, julga-se que o emprego da telha será quase tão antigo como o do tijolo, mas o avançado estado de degradação de monumentos anteriores à época romana torna difícil ter ideia exata do que poderiam ter sido as coberturas e a forma como se aplicavam as telhas [2,6]. Uma vez generalizado o uso da telha, e dadas as suas qualidades de resistência e duração, a mesma passou também a ser utilizada como elemento decorativo, aparecendo, deste modo, peças acessórias, por vezes pintadas, como cabeças de mulher, flores e folhas, animais, entre outras [5–7]. Os romanos utilizavam duas espécies de telhas. Umas, as *Tégulae* planas, de forma retangular, munidas de rebordos laterais nos seus lados mais compridos e tendo em média cerca de 34 a 40 centímetros de comprimento por 23 a 27 centímetros de largura. As outras, chamadas *Imbrices* e de secção semi-cilíndrica, eram utilizadas para recobrir as juntas deixadas pelas *Tégulae* (Figura 1.1a) [6]. O uso das telhas romanas mantém-se muito tempo na Europa, tendo sido utilizadas em França até ao século XI [4,6]. Com o passar dos anos, foram aparecendo novos tipos de telhas, como a telha *Champagne* (Flamenga) (Figura 1.1b) e a telha Canudo (Figura 1.1c). Porém, as telhas romanas continuaram ainda a usar-se até ao século XVIII [6].

Foi em 1841 que se verificou a invenção que iria revolucionar o fabrico das telhas, dando-lhes o alto grau de perfeição que hoje possuem. Trata-se do aparecimento das telhas de encaixe, fabricadas mecanicamente, e cuja invenção se deve aos Irmãos Gilardon d’Altkirche, franceses, da Alsácia. Esta invenção permitiu, posteriormente, o aparecimento das telhas Marselha (Figura 1.1d) e Romana (Figura 1.1e) e, ainda mais tarde, uma outra resultante da junção das antigas telhas romanas, a telha Lusa (Figura 1.1f) [6].





Figura 1.1: Ilustração de algumas telhas marcantes da história, desde a época Romana (a), até aos dias de hoje (b-f). Na Umbelino Monteiro são fabricada as telhas Canudo (c), Marselha (d) e Lusa (f).

Atualmente, existem vários tipos de coberturas e materiais, mas a generalidade da Europa Meridional manteve a tradição e, em resultado desse facto, países como Portugal, Espanha, França, Itália e Grécia mostram, como elementos tradicionais nas suas paisagens, os telhados em cerâmica [4].

Ainda nos dias de hoje, a telha é considerada como um produto dotado de elevada capacidade técnica e funcional, longa duração com reduzida manutenção, fácil resolução e reduzido nível de agressividade para o meio ambiente [5, 7].

Devido à grande variedade de modelos, tonalidades e acessórios complementares, a telha assume-se como um produto de elevada flexibilidade em termos arquitetónicos, uma vez que é possível formar as mais variadas geometrias, garantindo sempre a funcionalidade e fiabilidade na resposta às exigências das mesmas [7].

### 1.1.3 A Umbelino Monteiro, S.A.

A Umbelino Monteiro foi criada em 1959, nas Meirinhas - Pombal (Figura 1.2), com o objetivo de produzir materiais de construção de base cerâmica. Inicialmente, os produtos fabricados restringiam-se à telha Lusa e ao tijolo. Mais tarde, a Umbelino Monteiro optou por se dedicar exclusivamente à produção de telhas de diferentes modelos.

Em 1982, a empresa deu início ao fabrico em série de telha Canudo [7].

Com a passagem da empresa a Sociedade Anónima, em 1997, a Umbelino Monteiro iniciou um ciclo de renovação tecnológica e expansão empresarial, criando novos produtos e acabamentos. Cinco anos mais tarde, foi criado um novo laboratório, totalmente equipado, para apoiar a investigação e desenvolvimento da produção e o Controlo da Qualidade, tendo a telha passado a ser produto certificado um ano depois [7].

Em 2004, a empresa apresentou uma nova marca de telhas, a Advance, exclusiva e inovadora tecnológica, estética e funcionalmente.



Figura 1.2: Umbelino Monteiro, S.A.

Três anos depois, a Umbelino Monteiro, S.A. foi integrada na multinacional ETEX GROUP<sup>4</sup>, passando a fazer parte de um notável grupo industrial da área dos materiais de construção.

Em 2011, a Umbelino Monteiro conquistou a certificação para a Gestão da Qualidade (ISO 9001) e tornou-se, também, a primeira empresa portuguesa de telhas cerâmicas a ser certificada com o Sistema de Gestão Ambiental, de acordo com a norma ISO 14001 [7].

Já este ano, a empresa pretende obter a certificação para o Sistema de Gestão da Segurança e Saúde no trabalho (OHSAS 18000).

## 1.2 Inspeção e controlo da qualidade

O conceito de *Qualidade*, associado à conformidade com as especificações do produto, é o primeiro passo para garantir a satisfação do cliente, que apresenta necessidades e exigências em relação a um bem ou serviço adquirido. Sendo assim, as empresas devem satisfazer essas necessidades, focando o trabalho no sentido de atender aos requisitos solicitados. Não adianta uma empresa acreditar que produziu um bem de qualidade ou prestou um excelente serviço, se os clientes não estiverem satisfeitos, pois eles são a única referência possível para julgar a qualidade de um produto [8].

Um sistema de melhoria da *Qualidade* é útil a qualquer empresa que deseje melhorar a qualidade do seu trabalho e, ao mesmo tempo, aumentar a sua produção, utilizando menos mão de obra e reduzindo os custos.

A evolução da *Qualidade* ao longo do século XX é um processo gradual, que pode ser descrito em quatro etapas: *Inspeção*, *Controlo de Qualidade*, *Garantia da Qualidade* e *Gestão da Qualidade Total*.

<sup>4</sup>Criado em 1905, o Grupo Etex é especializado no fabrico e comercialização de materiais de construção e sistemas de alta qualidade. Está presente em 45 países e é formado por mais de 100 empresas e 120 fábricas.

A *Inspeção da Qualidade* surgiu com a Revolução Industrial. A produção em massa aumentou em grande escala o desenvolvimento de produtos defeituosos, que eram detetados pelos inspetores da qualidade, que se limitavam a separar os produtos não conformes dos produtos conformes [9, 10].

O *Controlo da Qualidade* surgiu por volta dos anos 30, quando se começaram a aplicar algumas técnicas estatísticas. Nesta época, começou a supervisão das técnicas de controlo de amostragem e a análise das causas que levavam à produção de produtos não conformes. Durante a década de 60, o termo *Garantia da Qualidade* funcionava como um meio de assegurar a qualidade final do produto ou serviço prestado. A *Gestão da Qualidade Total* surgiu no final dos anos 80, quando o principal objetivo seria o aumento da satisfação dos clientes, a custos cada vez mais baixos [9, 10].

Atualmente, as empresas encontram-se inseridas num contexto económico variável em que os mercados se mostram cada vez mais abertos e competitivos. Em resposta às mudanças operadas nesses mercados e na procura de fatores que permitam obter e manter vantagens competitivas, a *Qualidade* tem vindo a afirmar-se como um importante fator de competitividade. São diversas as empresas a adotar as *práticas de Gestão da Qualidade*<sup>5</sup>, a abraçar a filosofia de *Gestão da Qualidade Total*<sup>6</sup> ou a tomar a iniciativa da certificação dos seus *Sistemas de Gestão da Qualidade* (SGQ)<sup>7</sup> como forma de mostrar o seu compromisso nesta área. Esta última via tem sido, sem dúvida, a seguida em Portugal, observando-se, por parte das empresas dos diversos sectores de atividade, um interesse crescente pela certificação, visível na evolução do número de empresas certificadas e que iniciaram esse processo, bem como a extensão da certificação a sectores considerados não tradicionais [8].

Os requisitos necessários à implementação de um *Sistema de Gestão de Qualidade* estão dispostos na norma NP EN ISO 9001:2015. Esta norma baseia-se em 7 princípios de gestão da qualidade: foco no cliente, liderança, comprometimento das pessoas, abordagem por processos, melhoria, tomada de decisão baseada em evidências e gestão das relações.

## Foco no cliente

«O foco primordial da gestão da qualidade é posto na satisfação dos requisitos dos clientes e no esforço por exceder as suas expectativas.» [11]

O sucesso é atingido quando uma organização atrai e retém a confiança dos clientes. Todos os aspetos da interação com o cliente proporcionam uma oportunidade de criar mais valor para este. Compreender as suas necessidades atuais e futuras contribui para o sucesso da organização.

---

<sup>5</sup>São exemplo de práticas de Gestão da Qualidade o programa 5S (senso da Utilização, Organização, Limpeza, Saúde e Disciplina, do japonês, *Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu e Shitsuke*), o programa Zero Defeitos, a utilização de placas, símbolos e figuras informativas na empresa e as Boas Práticas de Fabrico.

<sup>6</sup>Feigenbaum (1922-2014) definiu Gestão da Qualidade Total como «um sistema eficaz que integra o desenvolvimento da qualidade, a manutenção da qualidade e os esforços de melhoria da qualidade entre os diferentes sectores da empresa, com o objetivo de criar produtos/serviços com o máximo de economia e a plena satisfação dos clientes».

<sup>7</sup>Dá-se o nome de Sistema de Gestão da Qualidade à estrutura organizacional criada para gerir e garantir a Qualidade, os recursos necessários, os procedimentos operacionais e as responsabilidades estabelecidas.

## Liderança

*«Os líderes estabelecem a todos os níveis, unidade no propósito e na orientação e criam as condições para que as pessoas se comprometam no atingir dos objetivos da organização» [11]*

O estabelecimento de propósitos e a orientação e o comprometimento das pessoas permitem que uma organização alinhe as suas estratégias, políticas, processos e recursos para atingir os seus objetivos.

## Comprometimento das pessoas

*«Para a melhoria da capacidade da organização para criar e disponibilizar valor, é essencial que em todos os níveis da organização haja pessoas competentes, a quem tenham sido conferidos poderes e que estejam comprometidas.» [11]*

Para gerir de forma eficaz e eficiente uma organização, é importante respeitar e envolver todas as pessoas, a todos os níveis. O reconhecimento, o conferir poderes e a melhoria das competências facilitam o comprometimento das pessoas para que sejam atingidos os objetivos da qualidade da organização.

## Abordagem por processos

*«Resultados consistentes e previsíveis podem ser mais eficaz e eficientemente atingidos quando as atividades são compreendidas e geridas como processos inter-relacionados que funcionam como um sistema coerente.» [11]*

O SGQ é constituído por processos inter-relacionados. Compreender como é que o sistema produz os resultados permite que uma organização optimize o sistema e o seu desempenho.

## Melhoria

*«As organizações que têm sucesso estão permanentemente focadas na melhoria.» [11]*

A melhoria é essencial para que uma organização mantenha os níveis atuais de desempenho, reaja a alterações nas suas condicionantes internas e externas e crie novas oportunidades.

## Tomada de decisão baseada em evidências

*«As decisões baseadas na análise e na avaliação de dados e de informação são mais suscetíveis de produzir os resultados desejados.» [11]*

A tomada de decisões pode ser um processo complexo e envolve sempre alguma incerteza. Frequentemente envolve múltiplos tipos e fontes de entradas, bem como a sua interpretação, que pode ser subjetiva. É importante compreender as relações de causa e efeito e as potenciais consequências não esperadas. Factos, evidências e análise de dados conduzem a uma maior objetividade e confiança na tomada de decisões.

## Gestão das relações

«Para terem sucesso sustentado, as organizações gerem as suas relações com partes interessadas, como sejam os fornecedores.» [11]

As partes interessadas relevantes influenciam o desempenho de uma organização. É mais provável que o sucesso sustentado seja atingido quando a organização faz a gestão das relações com todas as suas partes interessadas para otimizar os respetivos impactos no seu desempenho. A gestão das relações com as suas redes de fornecedores e de parceiros é de particular importância.

A Umbelino Monteiro, S.A. implementou um *Sistema de Gestão Integrado* (SGI) no âmbito da Segurança, Qualidade e Ambiente, uma vez que acredita que estes são os elementos chave da organização, essenciais na satisfação dos clientes, e do desenvolvimento sustentável. O SGI da Umbelino Monteiro baseia-se na garantia da qualidade dos produtos e dos serviços, na gestão eficiente dos recursos e no respeito pelo meio ambiente, garantindo o cumprimento dos requisitos definidos nas normas NP EN ISO 9001, NP EN ISO 14001, NP 4397/OHSAS 18000 e NP EN 1304.

No SGI estão descritos todos os ensaios realizados por parte da empresa como, por exemplo, a perda ao rubro, a granulometria, o despiste de calcário, a determinação da resistência mecânica e da absorção de água e a avaliação da tonalidade, brilho e textura. Na UM, à semelhança de outras empresas cerâmicas, estes últimos parâmetros são controlado através de inspeção visual. Para este tipo de controlo recorre-se a pessoas com elevado grau de experiência na deteção de defeitos, tal é a sua especificidade e variedade. Ainda assim, 20% das reclamações que a Umbelino Monteiro recebe num ano deve-se à falta de conformidade da cor nas telhas e acessórios.

Pesquisas recentes têm comprovado que a imagem digital é uma alternativa à inspeção visual, sendo uma técnica de baixo custo, rápida e não-invasiva, que permite uma inspeção e controlo de qualidade em diversos sectores e processos industriais, com uma boa precisão. Nas próximas secções fala-se com mais pormenor sobre esta alternativa.

## 1.3 A origem do processamento de imagem digital

As primeiras aplicações de imagens digitais surgem nos meios de comunicação, no início dos anos 20, através do sistema Bartlane<sup>8</sup> para transmissão intercontinental de imagens por cabo submarino [12, 13].

Alguns dos problemas iniciais para tentar melhorar a qualidade visual das primeiras figuras digitais estavam relacionados com a seleção dos processos de impressão e com a distribuição dos níveis de cinza. O primeiro sistema Bartlane era capaz de codificar imagens em cinco níveis de cinza distintos. Essa capacidade foi aumentada para quinze níveis, em 1929 [13].

---

<sup>8</sup>O sistema Bartlane foi um método de transmissão de imagens adaptado para os meios de comunicação. Este sistema foi inventado em 1920 por Bartholomew e MacFarlane, dois jornalistas londrinos do *The Daily Mirror*. Este método tinha como objetivo facilitar a transferência de fotografias jornalísticas entre Londres e Nova Iorque. Com esta invenção o tempo de transmissão das fotografias foi reduzido de uma semana para três horas.

Ao longo dos 35 anos que se seguiram, foram efetuadas melhorias nos métodos de processamento para a transmissão de imagens digitais.

A primeira imagem digital criada por um computador data de 1957 e foi realizada pelo engenheiro dos Estados Unidos da América, Russell Kirsch, no NBS - *National Bureau of Standards*, agora NIST - *National Institute of Standards and Technology*<sup>9</sup>. A imagem era a do seu filho em bebé, numa foto de  $5 \times 5$  cm (Figura 1.3). O então NBS desenvolveu o primeiro computador programável, o *Standards Eastern Automatic Computer* (SEAC). Este computador continha um scanner com tambor rotativo e, com ele, foi possível digitalizar a fotografia do bebé, que entrou para a história como a primeira imagem adquirida e armazenada pela representação digital da imagem. A fotografia foi registada com 176 pixels a preto e branco [14].



Figura 1.3: Primeira imagem digital realizada por Russell Kirsch. *Adaptado de* [14].

Com esta iniciativa, Kirsch foi considerado um dos pioneiros na computação e abriu caminhos para o desenvolvimento dos processos de aquisição, armazenamento, processamento e difusão da imagem [14].

Em 1964, o processamento digital de imagens já era efetuado com recurso a técnicas de computação e, nesse ano, foram processadas imagens da superfície lunar, transmitidas pelo Ranger 7<sup>10</sup>, permitindo corrigir vários tipos de distorção de imagem inerentes à câmara a bordo.

O uso das técnicas computacionais serviu de base para métodos melhorados no realce e restauro de imagens de diversas missões espaciais [13].

Juntamente com as aplicações espaciais, as técnicas digitais de processamento de imagem começaram a ser utilizadas na área da Medicina, com a invenção da Tomografia Axial Computorizada (TAC), no início dos anos 70 [12].

<sup>9</sup>O NIST é uma agência governamental dos Estados Unidos da América que promove a inovação e a competitividade industrial do país, promovendo a metrologia, os padrões e a tecnologia, de forma a ampliar a segurança económica e melhorar a qualidade de vida.

<sup>10</sup>Sétima sonda utilizada no programa Ranger. O programa Ranger tinha como objectivo obter imagens em grande plano da superfície lunar.

A partir de 1985 foi disponibilizado o tratamento com imagens RGB<sup>11</sup> e, nos finais dos anos 80, a comunidade quimiométrica juntou-se a este campo, introduzindo ferramentas que já estavam a ser utilizadas em estudos espectroscópicos e que se mostraram poderosas para a análise de imagens.

Desde 1960 até aos dias de hoje, o processamento de imagem tem-se tornado numa tecnologia essencial e economicamente viável em inúmeras aplicações práticas, tais como: Medicina, Astronomia, Inspeção Industrial, Controlo de Qualidade, Biometria, Biologia, Vigilância, Análise de Documentos e Investigação Criminal [12]. Nos dias de hoje, a técnica de processamento de imagens digitais é cada vez mais importante devido à sua capacidade de execução de análises rápidas, baixo custo, não destrutiva e, quando combinada com os dispositivos mecânicos e instrumentais, substitui esforços humanos no desempenho de um dado processo.

Industrialmente, são já várias as fábricas que utilizam a análise de imagens com o objetivo de controlar a qualidade e similaridade de produtos gerados numa linha de produção. A inspeção visual manual de peças (ou matérias-primas), além de ser um processo monótono e sujeito a erros, é um processo que encarece o produto, uma vez que é necessária uma maior mão de obra. Para otimizar este aspeto do processo de produção estão então a ser desenvolvidos métodos de inspeção visual por computador, utilizando o processamento de imagem [15].

---

<sup>11</sup>Modelo cromático que faz uso das componentes cromáticas Vermelho, Verde e Azul (do inglês, *Red*, *Green*, *Blue*).

## Capítulo 2

# Fundamentação

Neste capítulo são abordados os conceitos importantes relativos às propriedades das argilas e o seu comportamento durante o processo de cozedura. São descritas as etapas do fabrico das telhas cerâmicas na Umbelino Monteiro, S.A. e são identificadas as duas gamas utilizadas neste estudo.

Faz-se ainda referência a alguns aspetos relevantes relativos ao processamento de imagem, onde serão destacadas algumas publicações efetuadas nessa área na última década.

Por último, é feita a referência a conceitos relacionados com o tratamento estatístico de dados, nomeadamente as ferramentas de qualidade, fundamentais num Sistema de Gestão da Qualidade, e alguns testes estatísticos utilizados na análise de resultados do projeto.

### 2.1 Argila

Como referido na secção 1.1.2, os produtos cerâmicos são obtidos através da secagem e cozedura de argilas.

Para entender o que é a argila como matéria-prima cerâmica, é necessário considerar as suas origens geológicas.

Há cerca de 4600 milhões de anos, a Terra era uma massa incandescente de elementos em fusão. Os elementos mais pesados, como o níquel (Ni) e o ferro (Fe), com densidades de 8.9 e 7.8  $g/cm^3$ , respetivamente, concentraram-se nas camadas mais fundas, enquanto que os elementos mais leves, tal como o silício (Si) e o alumínio (Al), cujas densidades variam entre 2.42 e 2.7  $g/cm^3$ , permaneceram nas camadas mais superficiais [16].

Há cerca de 3800 milhões de anos, a camada superficial começou a solidificar e, 1000 milhões de anos mais tarde, formou-se a crosta terrestre. Inicialmente, a crosta terrestre apresentava uma composição uniforme, no entanto, devido a alterações ao longo do tempo, esta tem vindo a alterar. Por outro lado, estas alterações apenas têm afetado a superfície, pelo que, a partir de uma certa profundidade, a crosta é uniforme e constituída por basalto (rocha magmática formada a partir do arrefecimento do magma) [16].

A tabela 2.1 descreve a composição média de todas as rochas magmáticas.



Tabela 2.1: Composição média das rochas magmáticas.

Composto	Quantidade (%)
SiO <sub>2</sub> (dióxido de silício, sílica)	59.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de alumínio, alumina)	15.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido férrico)	6.88
CaO (óxido de cálcio)	5.08
Na <sub>2</sub> O (óxido de sódio)	3.84
MgO (óxido de magnésio)	3.49
K <sub>2</sub> O (óxido de potássio)	3.13
H <sub>2</sub> O (água)	1.15
TiO <sub>2</sub> (dióxido de titânio)	1.05
Outros	0.90
<b>TOTAL</b>	100

Esta composição evidencia que apenas dois óxidos, a sílica e a alumina, formam 75% da crosta terrestre. Estes compostos são, também, os constituintes básicos da argila [16].

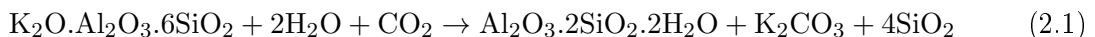
A limitação de compostos que formam a crosta terrestre faz com que a quantidade de minerais aí presentes também seja reduzida (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Minerais que compõem a crosta terrestre.

Mineral	Quantidade (%)
Feldspato	59.5
Ferro e Magnésio	16.8
Quartzo	12.0
Mica	3.8
Titânio	1.5
Outros	6.4
<b>TOTAL</b>	100

O feldspato é o mineral mais abundante na crosta terrestre. Porém, é bastante raro encontrar este mineral na sua forma pura. O mais frequente é encontrá-lo cristalizado com outros minerais, formando rochas como, por exemplo, o granito. Ao longo dos tempos, por ação de intempéries, o feldspato transforma-se em argila. O grande agente da sua transformação é a água (H<sub>2</sub>O) que, na presença de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dissolve parte do óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) e da sílica (SiO<sub>2</sub>). Depois de algum tempo em contacto com a humidade, a sílica e a alumina restantes hidratam e transformam-se em argila (caulino) [16].

A equação 2.1 descreve o processo de formação da argila (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O).



### 2.1.1 Composição química da argila

Como verificado na secção anterior, a argila pura apenas é composta por uma parte de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), duas de sílica (SiO<sub>2</sub>) e duas de água (H<sub>2</sub>O). No entanto, esta dificilmente é encontrada sem impurezas. Na prática, uma amostra de argila contém apenas 30 a 50% do mineral argiloso

(caulinite), existindo uma série de compostos não plásticos que constituem cerca de dois terços da amostra [16]. Na tabela 2.3 é representada a composição química de uma amostra de argila.

Tabela 2.3: Caracterização química de uma amostra de argila.

Composto	Quantidade (%)
SiO <sub>2</sub> (dióxido de silício, sílica)	38.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de alumínio, alumina)	16.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido férrico)	4.87
TiO <sub>2</sub> (dióxido de titânio)	1.60
CaO (óxido de cálcio)	17.03
MgO (óxido de magnésio)	4.41
Na <sub>2</sub> O (óxido de sódio)	0.47
K <sub>2</sub> O (óxido de potássio)	2.85
Perda ao rubro	13.38
Outros	0.07
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Todos estes compostos influenciam as características físicas e mecânicas da argila.

### Sílica

A sílica (SiO<sub>2</sub>) pode ser encontrada como constituinte do mineral argiloso e sob a forma de sílica livre (quartzo). O quartzo apresenta grande dureza (7 Mohs<sup>1</sup>) e é refratário, isto é, resiste a temperaturas muito elevadas, apresentando um ponto de fusão próximo de 1460°C.

Durante os primeiros instantes de cozedura (até 573°C), o quartzo dilata até estabilizar. No entanto, esse processo é reversível, pelo que existe contração aquando o arrefecimento até à temperatura ambiente (processo designado por retração). Se o quartzo presente na argila possuir grãos de grandes dimensões, durante a cozedura, estes irão expandir mais do que a argila, dando origem a uma cerâmica mais porosa e com menor resistência mecânica [16].

Assim, a presença de sílica na argila reduz a percentagem de humidade, a retração da peça e torna-a mais refratária. Para além disso, diminui a sua resistência mecânica e aumenta a porosidade, resultando na aceleração do processo de secagem.

### Alumina

Depois da sílica, a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é o composto mais abundante na argila. É também um componente refratário muito resistente, com temperatura de fusão próxima de 2000°C.

Ao contrário do que acontece com a sílica, a alumina encontra-se quase sempre no mineral argiloso.

Durante a cozedura da argila, a alumina cristaliza, aumentando a resistência mecânica da peça. Quanto maior a quantidade de alumina na argila, maior será a resistência mecânica da peça, a sua temperatura de fusão e o valor comercial da argila [16].

<sup>1</sup>A escala de Mohs quantifica a dureza dos minerais, isto é, a resistência que um determinado mineral oferece ao risco. Nesta escala são atribuídos valores de 1 a 10. O valor de dureza 1 corresponde ao material menos duro da escala (talco) e o valor 10 é característico da substância mais dura conhecida na natureza (diamante).

### Óxido férrico

O óxido de ferro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) é o composto de ferro mais encontrado na argila. No processo de cozedura de cerâmica vermelha, abaixo de  $1050^\circ\text{C}$ , o óxido férrico surge na forma de hematite, conferindo a cor avermelhada característica das peças.

Acima de  $1050^\circ\text{C}$ , o óxido de ferro (III) transforma-se em magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), apresentando uma coloração acastanhada.

Para além da sua característica cromática, o óxido férrico é, também, refratário [16].

### Dióxido de titânio

Todas as argilas contêm titânio, que se encontra em percentagens na ordem de 0.1 a 4% de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ). Nas argilas utilizadas na cerâmica vermelha a quantidade deste composto é maior que nas utilizadas no fabrico de porcelana [16].

Apesar de não ser considerado um corante, o dióxido de titânio aumenta a intensidade da cor amarela no óxido férrico, cor indesejável, sobretudo na porcelana.

### Óxidos de cálcio e magnésio

Estes óxidos encontram-se na argila sob a forma de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e de carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ).

Durante a cozedura, o  $\text{MgCO}_3$  decompõe-se a partir dos  $600^\circ\text{C}$ , enquanto que o  $\text{CaCO}_3$  apenas o faz a partir dos  $900^\circ\text{C}$ . Essa decomposição resulta na libertação de  $\text{CO}_2$ , permanecendo na peça os óxidos de cálcio e de magnésio. Estes óxidos reagem com a sílica, dando origem a silicato de magnésio ( $\text{MgSiO}_3$ ) e a silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) [16]. Os cristais resultantes constituem uma espécie de estrutura cristalina interna que aumenta a resistência mecânica da peça e diminui a sua deformação (empeno).

Por outro lado, o dióxido de carbono, formado na decomposição dos carbonatos, acumula-se nos poros da peça, dilatando-os, contribuindo para neutralizar a retração do processo de cozedura e aumentar a porosidade do produto [16]. Assim, se se pretender fabricar um produto de baixa porosidade, devem ser utilizadas argilas com o menor conteúdo possível de carbonatos.

### Óxidos de sódio e potássio

A quantidade de óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) presentes numa argila determina a temperatura necessária para atingir um determinado grau de cozedura da peça, de acordo com a resistência mecânica e absorção desejadas.

Estes óxidos atuam como refratários até aos  $1050^\circ\text{C}$ . A partir desta temperatura, são fundentes muito ativos que deformam a peça [16].

### Perda ao rubro

A perda ao rubro, isto é, a perda de peso durante o processo de cozedura, está relacionada com a libertação de componentes voláteis e deve-se, principalmente, a três fatores.

Uma das consequências da perda de peso é a perda de água de cristalização, que resulta da decomposição do retículo cristalino dos minerais argilosos e, conseqüentemente, da perda de

grupos -OH. Esta perda de peso é tanto maior quanto a quantidade de minerais argilosos e a plasticidade da argila. Uma perda de peso na ordem dos 6 a 12% é considerada normal. Abaixo desses valores, pode-se concluir que a pasta é constituída predominantemente por compostos inertes, como é o caso do quartzo [16].

A decomposição do carbonato de cálcio com a libertação de dióxido de carbono leva, também, à perda ao rubro. Esta perda aumenta com a quantidade de carbonatos presentes na argila. É frequente encontrar argilas com perdas ao rubro na ordem dos 15 a 20% [16].

A calcinação da componente orgânica residual também provoca uma diminuição do peso final da peça, uma vez que há libertação de dióxido de carbono e água.

### 2.1.2 Efeito do calor nas argilas

A cozedura constitui a fase mais importante e delicada do processo de fabrico de cerâmica. É nesta etapa que a peça adquire as propriedades desejadas, ao mesmo tempo que se confirma se as fases anteriores foram corretamente levadas a cabo.

Para otimizar o processo de cozedura e evitar a formação de defeitos, é necessário conhecer as alterações que ocorrem durante o processo. A ação do calor sobre os corpos cerâmicos resulta em diferentes alterações físicas e químicas [16, 17].

No início do processo de cozedura, até aos 200°C, ocorre uma pequena reação endotérmica, resultante da eliminação da água absorvida pela superfície da argila, a qual se dá o nome de secagem.

Entre os 200 e 700°C ocorre a oxidação das substâncias orgânicas.

Aos 573°C o quartzo encontra-se na sua forma de máxima dilatação, provocando uma expansão rápida de volume. A rapidez deste fenómeno pode provocar roturas nos corpos cerâmicos.

Dos 400 aos 600°C, ocorre a desintegração da estrutura da argila, onde os grupos -OH dos cristais são libertados sob a forma de vapor de água, originando estruturas amorfas. Os corpos cerâmicos diminuem ligeiramente de volume e aumentam de porosidade.

A perda de água é mais intensa entre os 500 e 600°C e mais lenta a partir dessa temperatura, pelo que o processo de desidratação considera-se terminado por volta dos 800°C.

Dos 885 aos 925°C a estrutura amorfa começa a converter-se em cristais cúbicos estáveis (espinela).

Aos 970°C ocorre uma reorganização da estrutura da argila, com a formação de uma nova fase cristalina. Quanto maior for esta cristalização, melhor será a resistência mecânica do corpo cerâmico.

A vitrificação ocorre entre 1000 e 1100°C, auxiliada pelos fundentes presentes na pasta. A vitrificação aumenta de volume à medida que a temperatura aumenta. O vidro formado vai fechando os poros da peça, diminuindo a sua porosidade e o quartzo reduz a retração, que cessa aos 1200°C.

No fabrico da telha cerâmica, a etapa de vitrificação não chega a acontecer, uma vez que a sua temperatura de cozedura média é de 1045°C e o processo de vitrificação inicia-se por volta dos 1100°C.

A figura 2.1 representa esquematicamente as perdas de peso e a deteção de transformações químicas que ocorrem durante o processo de cozedura de uma peça cerâmica.

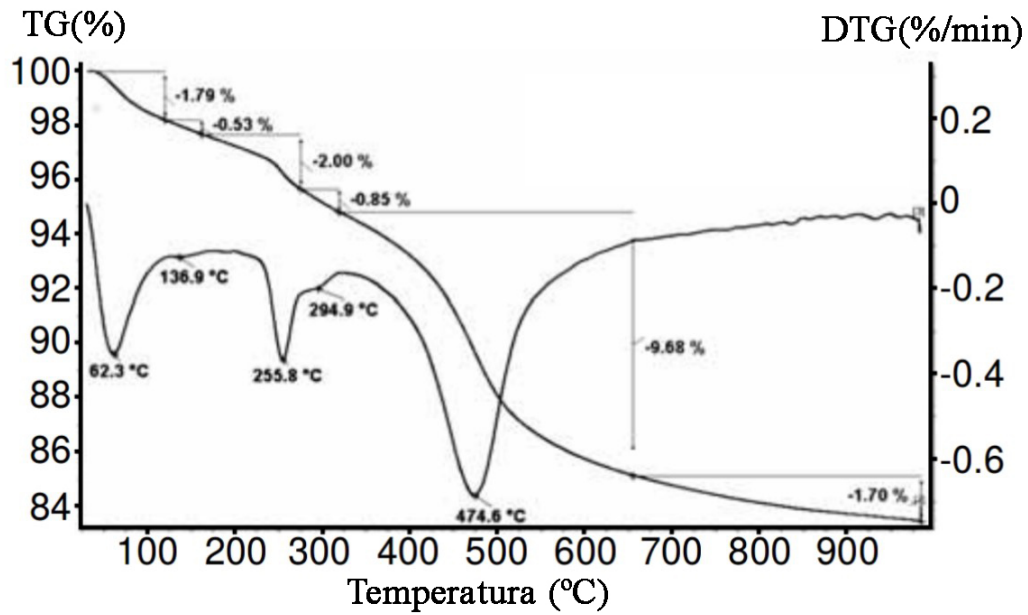


Figura 2.1: Representação de um termograma (TG%) onde se regista a evolução da massa de uma peça cerâmica em termos percentuais e de uma termogravimetria diferencial (DTG) que identifica as temperaturas de ocorrência das maiores perdas de massa. *Adaptado de* [18].

## 2.2 Processo de fabrico da telha cerâmica na Umbelino Monteiro

Na figura 2.2 é representado o fluxograma do Processo Produtivo da Umbelino Monteiro, S.A., nas diferentes linhas de produção.

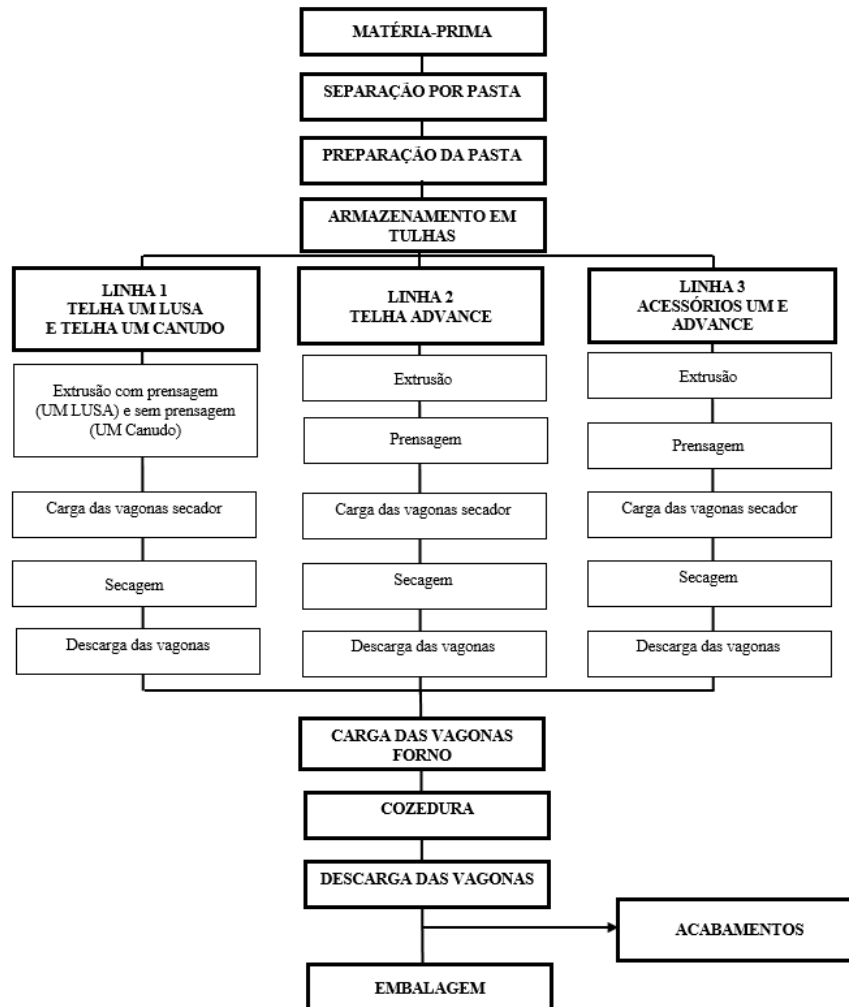


Figura 2.2: Fluxograma do Processo Produtivo da Umbelino Monteiro, S.A.

Na UM, as argilas são armazenadas a céu aberto antes de serem utilizadas no processo de fabrico, onde ficam expostas às intempéries durante algum tempo, permitindo o seu envelhecimento (Figura 2.3a). Esta etapa é importante no processo, pois permite uma redução da matéria orgânica, já que esta se degrada com o decorrer do tempo. Além disso, a humidade vai diminuindo e ocorre uma desagregação da matéria-prima. Todas estas particularidades são imprescindíveis para melhorar a qualidade da argila.

Seguidamente, são preparados os lotes, que consistem na mistura de diferentes argilas com areia, permitindo otimizar o comportamento da matéria-prima.

As misturas são encaminhadas para o doseador e, depois, para o seleccionador. Este último permite a extração de pedras, raízes, lenhites<sup>2</sup> e outros corpos estranhos. Após esta operação

<sup>2</sup>Rocha sedimentar combustível, parecida ao carvão.

surge o laminador que tem como função colocar a mistura sobre a forma de lamelas, facilitando o seu manuseamento nas etapas seguintes.

As linhas de produção são constituídas por um doseador, onde é colocada a pasta pretendida. A partir deste, a pasta segue através de uma tela, onde são acrescentados aditivos e água, sendo então encaminhada para o amassador que permite obter uma mistura homogênea, com um correto valor de humidade, permitindo obter um produto final com qualidade.

Em seguida, surge o processo de laminagem. Este é utilizado para garantir a compactação da mistura e uma baixa granulometria<sup>3</sup>, contribuindo para um bom acabamento.

Na extrusora, a pasta é comprimida através de um sistema de hélices contra um molde. Este dá forma à telha, pré-moldando-a numa lastra com o formato similar à telha (Figura 2.3b).

De seguida, a telha é prensada (Figura 2.3c) e os restos resultantes do corte são reenca-minhados para a extrusora. Neste momento, a telha apresenta a sua forma definitiva (Figura 2.3d) que é colocada nas vagonas<sup>4</sup> para secagem (Figura 2.3e). Os secadores permitem retirar humidade às telhas, ficando apenas alguma humidade residual. O calor é injetado no topo do secador por ventiladores centrífugos, ficando depois distribuído de forma uniforme, com o auxílio de ventoinhas, tornando, desta forma, a secagem eficiente.

Após a secagem, as vagonas são encaminhadas para a descarga, onde as telhas são posteriormente colocadas em vagonas que seguem para o forno. As vagonas são constituídas por material refratário, que resiste a elevadas temperaturas (Figura 2.3f).

Após a descarga das vagonas com os produtos cozidos (Figura 2.3g), as telhas passam por uma linha de escolha, onde as telhas são verificadas por uma pessoa qualificada. De seguida, o material é agrupado em molhos e colocado em paletes, sendo corretamente cintado e plastificado, para impedir as quebras ao longo do transporte.

A decoração da telha pode ser realizada antes ou após a cozedura. A decoração consiste na aplicação de acabamentos, permitindo a obtenção de telha rústica e colorida (Figura 2.3h).

A maior diferença existente entre as diferentes linhas de produção é o modo como a prensagem é feita. Enquanto que na Linha 1 (produção da gama UM) os moldes são de borracha, na Linha 2 (produção da gama Advance Premium) os moldes são de gesso. Estes moldes permitem conformar na telha uma série de pormenores que, de outra forma, seria impossível, concedendo um melhor acabamento da telha. Para além disso, os processos de carga e descarga das vagonas e da secagem na Linha 2, é diferente ao nível dos suportes que levam as telhas ao forno. Estes suportes são individuais, evitando, assim, o empeno<sup>5</sup>.

---

<sup>3</sup>Dimensões dos grãos

<sup>4</sup>“Estantes” de transporte das peças.

<sup>5</sup>Curvatura nas telhas provocada pelo calor.



(a) Parque das argilas



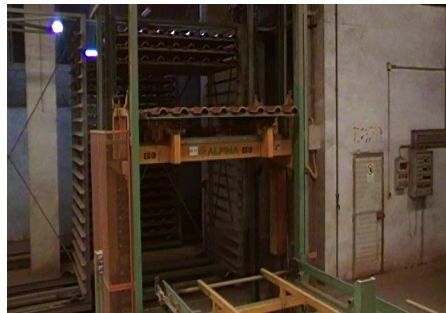
(b) Extrusão



(c) Prensagem



(d) Telha prensada



(e) Carregamento da vagona para secagem



(f) Suporte refratário



(g) Saída da vagona do forno



(h) Cabines de aplicação de acabamentos

Figura 2.3: Etapas do fabrico de telhas na UM. As argilas são armazenadas a céu aberto (a), de modo a perderem a sua matéria orgânica, reduzirem a humidade e desagregarem-se. Depois de preparada a pasta com as matérias-primas pretendidas, esta é laminada e amassada. Segue então para a extrusora (b), onde a pasta adquire a forma da telha, através da sua compressão num molde. Na prensagem (c), a telha adquire a sua forma definitiva (d) e a pasta restante é reencaminhada de novo para a extrusora. As telhas seguem em vagonas para a estufa (e) e, posteriormente, são colocadas em suportes de material refratário (f) para irem ao forno. Após a descarga das vagonas com a telha cozida (g), estas são inspecionadas e embaladas. Caso se pretenda uma telha com acabamentos, estes podem ser aplicados antes ou depois da sua cozedura (h).



### 2.2.1 Telha UM Lusa

«Fruto de muitos anos de experiência e investigação no aperfeiçoamento do processo de fabrico, quer ao nível tecnológico quer na seleção das melhores matérias-primas, a telha UM Lusa garante grande resistência à flexão e ao choque, elevados níveis de estanquidade e um encaixe robusto e fiável. Sendo mais leve e maior que outros modelos, permite maior rentabilidade e maior rapidez na montagem.» Catálogo UM Lusa

Representando 30% da produção total da Umbelino Monteiro, S.A., a telha UM Lusa pode ser encontrada nas tonalidades Vermelho e Castanho (Figura 2.4). A cor avermelhada da telha, como referido na secção 2.1.1, é obtida naturalmente, devido ao elevado teor de óxido de ferro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que se encontra na argila. Já a cor acastanhada pode ser obtida com a adição à pasta de uma suspensão contendo dióxido de manganês ( $\text{MnO}_2$ ).

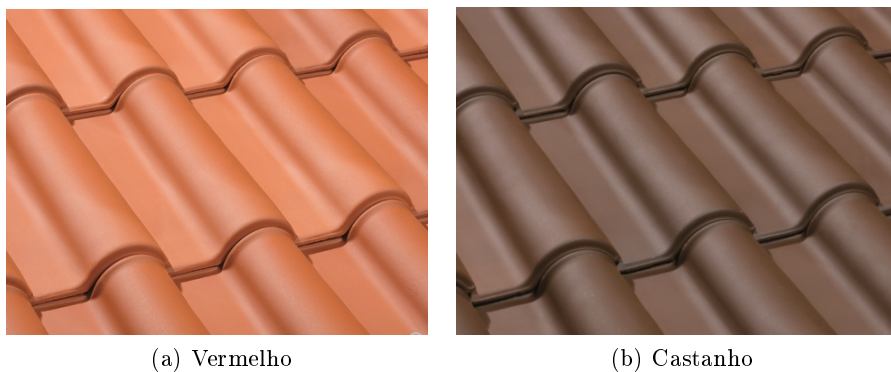


Figura 2.4: Tonalidades da gama UM Lusa.

Esta telha é produzida na Linha 1, de acordo com o processo descrito na secção 2.2.

A telha UM Lusa, à semelhança das restantes telhas produzidas pela UM, é certificada segundo a norma NP EN 1304, que define os critérios de conformidade para as telhas e acessórios cerâmicos.

### 2.2.2 Telha Advance Premium Lusa

«A telha Advance Premium Lusa, inspirada na tradicional telha lusa, alia a popularidade da forma, com a consistência técnica do processo produtivo. Diferente e revolucionária, esta telha conquistou a preferência dos consumidores mais exigentes. Fabricada com as melhores matérias-primas, onde se destaca a pasta grés e a utilização de moldes de gesso, a telha Advance Premium é um produto de referência que assegura ótimos níveis de resistência e durabilidade, com uma garantia de 35 anos.» Catálogo Advance Premium Lusa

A gama Advance Premium Lusa tem como principais telhas a Vermelha, a Sintra e a Branca. Estas três tonalidades são conseguidas através de pastas de diferentes composições. Enquanto que a pasta vermelha é composta por 85% de argilas de diferentes propriedades e 15% de areia fina, a pasta branca é adquirida a fornecedores externos. A telha Sintra é conseguida com a junção de 90% de pasta branca a 10% de pasta vermelha.

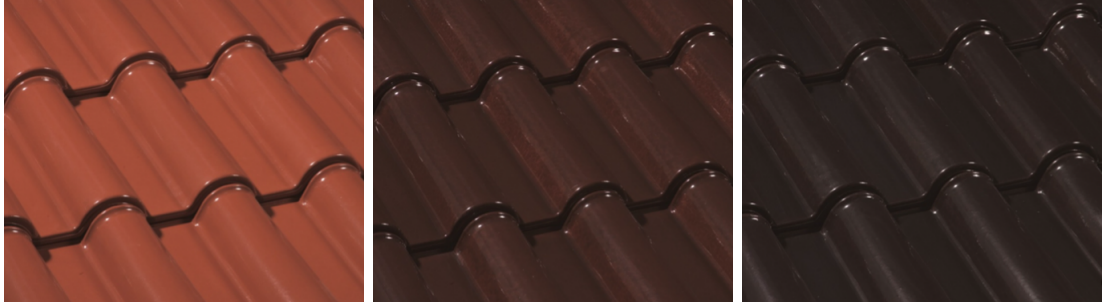
Esta gama representa 30% da produção total na empresa, sendo constituída por mais 11 tonalidades, para além das 3 principais. Na figura 2.5 estão representadas todas as tonalidades disponíveis na gama Advance Premium Lusa..



(a) Vermelho

(b) Sintra

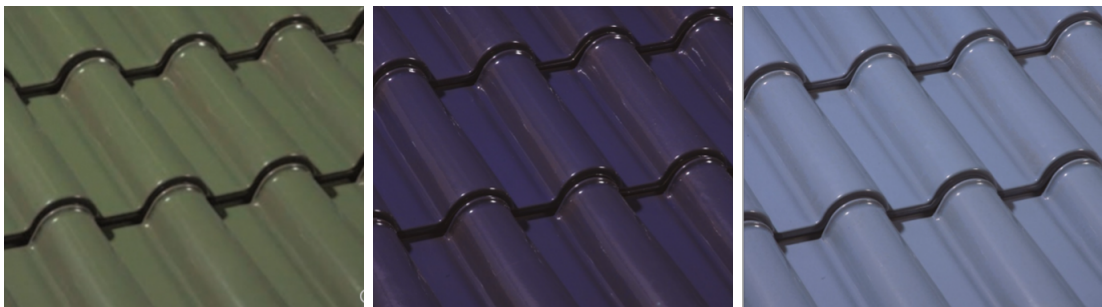
(c) Branco



(d) Vidrado Vermelho Transparente

(e) Vidrado Castanho

(f) Vidrado Preto



(g) Vidrado Verde Musgo

(h) Vidrado Azul

(i) Vidrado Azul Celeste



(j) Vidrado Branco Transparente

(k) Vermelho Envelhecido

(l) Coimbra



(m) Açores

(n) Vilamoura

Figura 2.5: Tonalidades presentes na gama Advance Premium Lusa.

Todas as telhas vidradas, exceto a de vidro branco transparente, têm como base a telha vermelha, onde é aplicado um vidro colorido característico de cada produto.

O processo de fabrico destas telhas na Linha 2 está descrito na secção 2.2.

A telha Advance Premium Lusa também é certificada pela norma NP EN 1304.

## 2.3 Luz e cor

A radiação eletromagnética é constituída por fotões que apresentam comportamento ondulatório. Estas partículas elementares são as intermediárias da interação e da força eletromagnética e a sua energia pode ser calculada pela equação 2.2,

$$E = h\nu \quad (2.2)$$

onde  $h$  é a constante de Planck ( $\sim 6.626 \times 10^{-34} J.s$ ) e  $\nu$  representa a frequência da radiação (em  $Hz$ ).

O comprimento de onda fica definido pela frequência e pela velocidade da radiação através da equação 2.3,

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda ( $m$ ) e  $c$  corresponde à velocidade de propagação de propagação da radiação eletromagnética ( $\sim 2.9979 \times 10^8 m.s^{-1}$  no vácuo).

A energia da radiação eletromagnética é, portanto, diretamente proporcional à sua frequência e inversamente proporcional ao seu comprimento de onda.

O estudo de diversas fontes de radiação mostra que esta é constituída por fotões com diversos comprimentos de onda que, habitualmente, se classificam em intervalos cujo nome está relacionado com a sua utilização ou perceção humana. Ao conjunto dessas radiações dá-se o nome de espectro eletromagnético [19].

O espectro eletromagnético cobre uma faixa enorme de energias e, portanto, de comprimentos de onda.

A faixa do espectro eletromagnético à qual o sistema visual humano é sensível denomina-se região do visível e apresenta uma gama aproximada de comprimentos de onda situados entre 380 e 780 nm [19–22]. A radiação eletromagnética fora dessa faixa não é perceptível pelo olho humano. Dentro desta estreita faixa de comprimentos de onda, o sistema visual humano é sensível a diversas cores, resultantes das contribuições das três cores fundamentais: o azul (435.8 nm), o verde (546.1nm) e o vermelho (700.0 nm).

A figura 2.6 identifica as diferentes gamas do espectro eletromagnético, estando destacada a região do visível, bem como as três cores fundamentais.

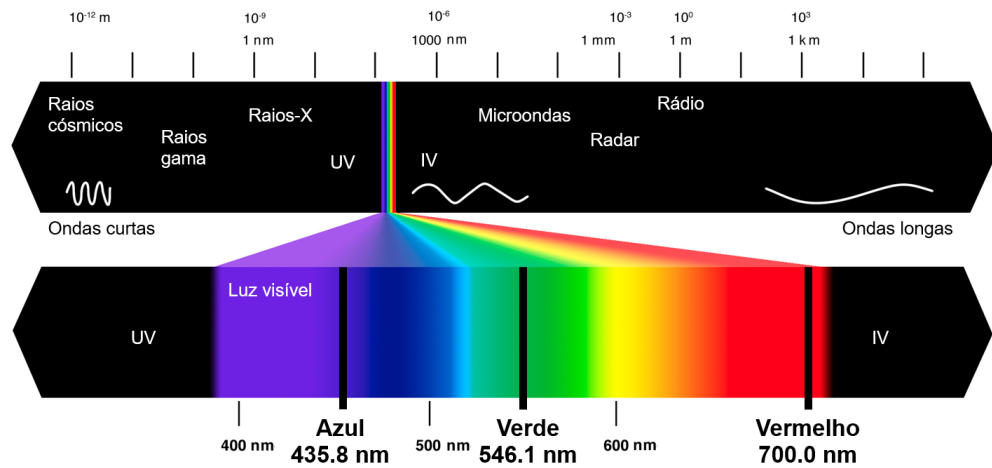


Figura 2.6: Representação esquemática do espectro eletromagnético e do espectro de luz visível, dando ênfase às três cores fundamentais (azul, verde e vermelho) como base da percepção cromática do olho humano.

## 2.4 Estrutura do olho humano

O olho humano permite a entrada de luz visível e é sensível à informação que ela transporta: possibilita-nos, assim, “ver” o que nos rodeia. Os diferentes comprimentos de onda da luz que entra nos nossos olhos produzem no órgão da visão sensações distintas, que interpretamos como diferentes cores [23].

De conformação aproximadamente esférica, o olho humano (Figura 2.7) possui um diâmetro médio aproximado de 2 a 2.5 cm. A radiação emitida ou refletida por objetos penetra no olho a partir de uma abertura frontal no centro da íris, denominada pupila. A sua abertura é variável, podendo contrair-se perante luz intensa e dilatar-se na escuridão, funcionando como diafragma e selecionando apenas os raios centrais. Por trás da íris encontra-se o cristalino, com a forma de lente biconvexa, constituído por diversas camadas biológicas transparentes de índices de refração diferentes, que focam e direcionam o feixe de luz para a retina, uma membrana sensível à luz, localizada na camada interna posterior do globo ocular [23].

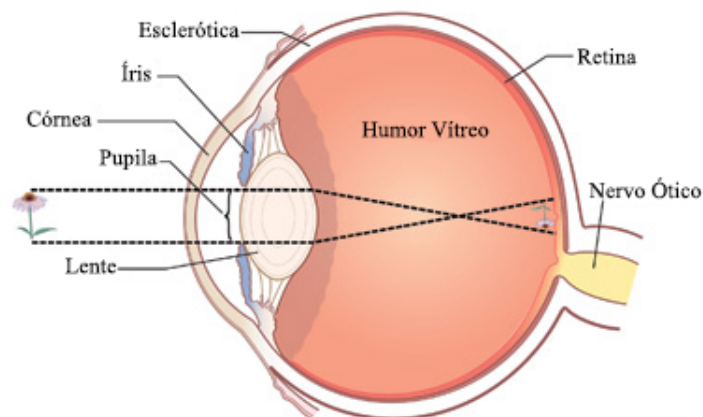


Figura 2.7: Representação esquemática das componentes mais relevantes da estrutura do olho e o seu modo de funcionamento.

A focagem de objetos implica a formação de uma imagem invertida e nítida sobre a retina (Figura 2.7). A retina contém dois tipos de foto-sensores: os cones e os bastonetes. Existem cerca de 6 a 7 milhões de cones em cada olho e estão localizados na porção central da retina, chamada de fóvea. Estes recetores são sensíveis às cores e apresentam alta resolução, sendo particularmente sensíveis em situações de boa luminosidade. O número de bastonetes é bastante maior, cerca de 75 a 150 milhões, distribuídos sob toda a superfície da retina. Os bastonetes servem para dar uma visão geral da imagem captada no campo de visão, estão relacionados com a definição da imagem no que respeita à sua forma e espaço envolvente, são insensíveis a cores, apresentam baixa resolução e são ativados em condições de baixa luminosidade. Os cones e os bastonetes são responsáveis pela conversão da energia luminosa em impulsos elétricos que serão transmitidos ao cérebro, para posterior interpretação [21,23].

A figura 2.8 ajuda a esclarecer como é que o olho humano percebe a cor, dando especial ênfase à constituição da retina, e a figura 2.9 mostra as curvas de sensibilidade dos cones para a luz de diferentes comprimentos de onda.

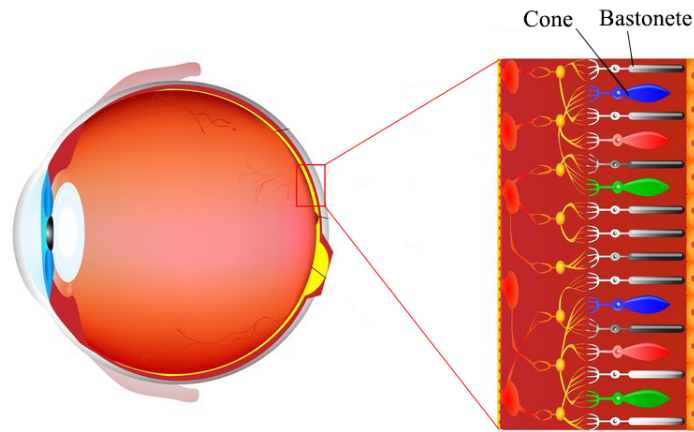


Figura 2.8: Representação gráfica da localização dos cones e dos bastonetes na retina do olho humano.

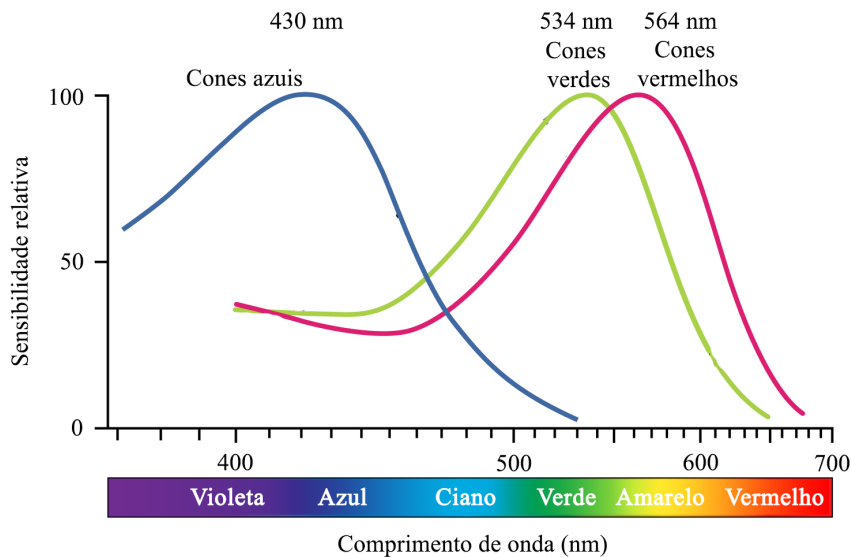


Figura 2.9: Representação gráfica das curvas de sensibilidade dos diferentes tipos de cones.

O olho humano possui três tipos de cones consoante os pigmentos que absorvem. Os cones apresentam sensibilidade máxima a 430 nm (azul-violeta), 534 nm (verde) e 564 nm (laranja-vermelho) [21]. Quando apenas um tipo de cone é estimulado, o cérebro percebe a cor correspondente. Por exemplo, se os cones sensíveis ao verde são estimulados, a pessoa vê a cor verde. Por outro lado, se os cones sensíveis aos comprimentos de onda de 534 nm e 564 nm são estimulados simultaneamente, a nossa percepção é a cor amarela.

As câmaras fotográficas atuais procuram mimetizar o modo de funcionamento do olho humano (Figura 2.10). A pálpebra do olho tem a função análoga à do obturador da câmara. O diafragma funciona como a pupila que encontramos na íris do olho, controlando a quantidade de luz que atravessa a lente. A lente da câmara é análoga ao conjunto formado pelo cristalino, córnea, humor aquoso e humor vítreo. Ambos têm o propósito de focar a luz, de modo a tornar nítidas as imagens que se formarão invertidas no plano focal. A coróide funciona como a câmara escura de uma máquina fotográfica. A retina corresponde ao sensor da máquina [24].

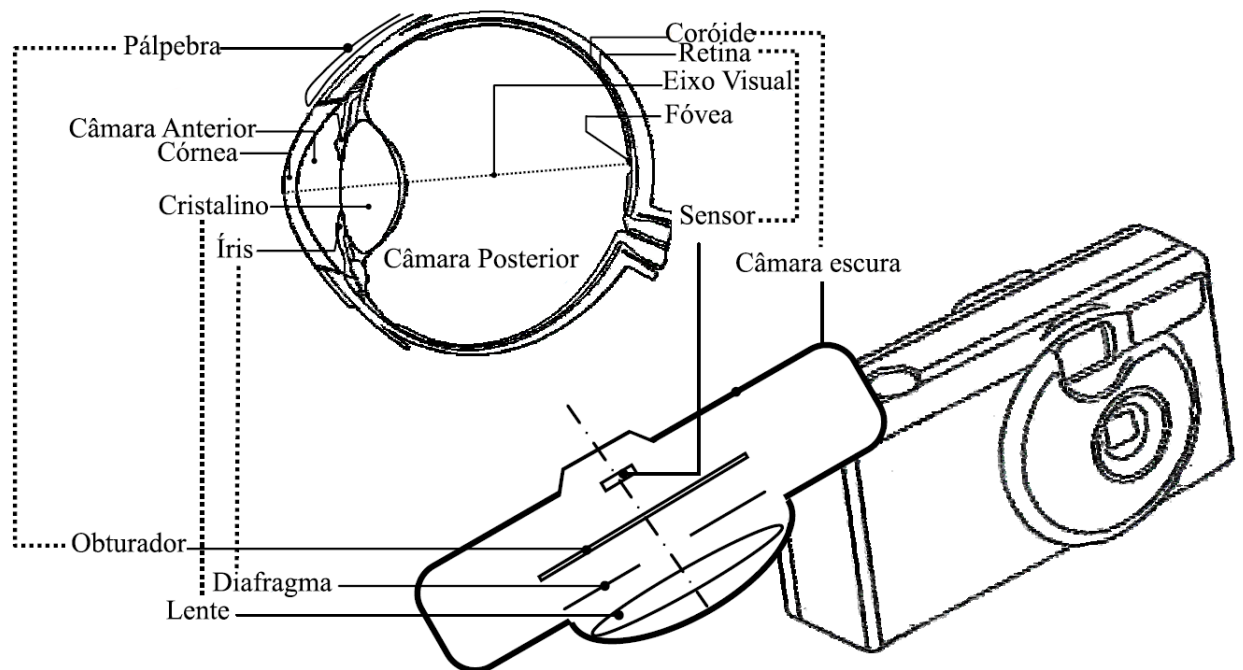


Figura 2.10: Representação esquemática da analogia estrutural e funcional entre o olho humano e a câmara digital. *Adaptado de [24]*

## 2.5 Modelos cromáticos

Um modelo cromático é um sistema de coordenadas onde cada cor é representada por um único ponto nesse espaço cromático. Ao longo dos últimos quatro séculos, foram propostos diversos modelos cromáticos, com diferentes maneiras de especificar a cor. Nesta secção, serão discutidos os modelos cromáticos mais utilizados no processamento de imagens digitais.

### 2.5.1 Modelo RGB

O sistema visual humano tende a perceber a cor como sendo um aglomerado de vários tons de vermelho, verde e azul, o que torna a visão humana particularmente sensível a estas cores, resultado da função das células cone da retina ocular [21]. Estas cores são chamadas de primárias e podem ser combinadas em proporções variáveis, dando origem às restantes cores que conhecemos. Este processo é denominado de aditivo e suscitou a concepção do modelo cromático RGB (*Red*, *Green* e *Blue*), para o qual a Comissão Internacional de Iluminação (CIE) estabeleceu, em 1931, os valores dos comprimentos de onda destas cores primárias, descritos na secção 2.3 [20, 24]. A combinação dessas cores, duas a duas e em igual intensidade, produz as cores secundárias, magenta, ciano e amarelo (Figura 2.11).

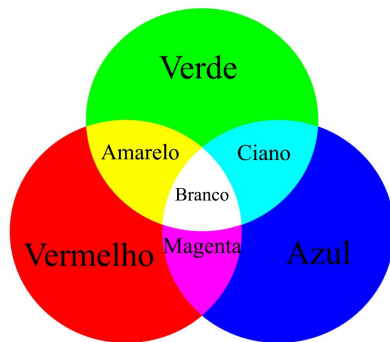


Figura 2.11: Representação da aditividade das cores primárias vermelho, verde e azul, do modelo cromático RGB.

O modelo RGB é baseado num espaço tridimensional de coordenadas cartesianas cujos eixos representam as intensidades de vermelho, verde e azul que compõem uma dada cor. Cada cor pode variar entre o mínimo (completamente escuro, ausência de cor) e máximo (completamente intenso, presença total de cor). Quando todas as cores têm intensidade mínima, o resultado é o preto (ausência de cor). Por outro lado, se todas as cores estão no máximo, o resultado é a cor branca (saturação da cor) [24].

Uma das representações mais usuais para as cores em computação é a utilização da escala de 0 a 255. Por exemplo, a cor primária azul é representada por  $(0, 0, 255)$ . A figura 2.12 ilustra o espaço de cor RGB através de um cubo, onde três dos seus vértices são as cores primárias, outros três as cores secundárias, o vértice junto à origem é o preto e o mais afastado da origem corresponde à cor branca. A escala de cinza é representada por uma linha (diagonal do cubo) que sai da origem até ao vértice mais distante dela, isto é, vai do preto até ao branco.

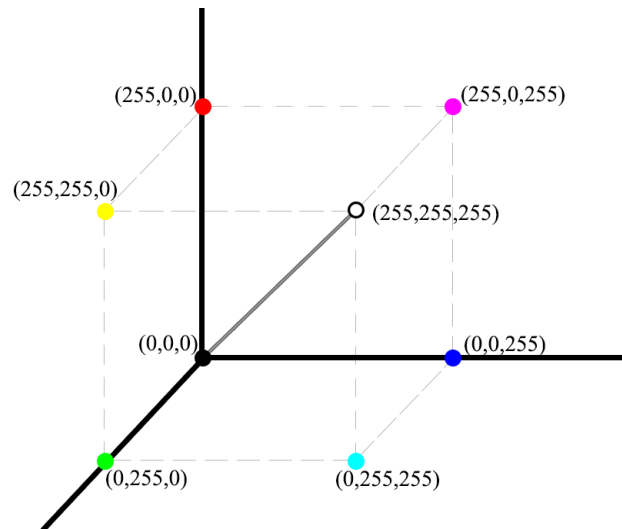


Figura 2.12: Representação esquemática do modelo RGB, em termos de coordenadas espaciais num sistema de eixos tridimensional.

Este modelo é o mais utilizado em *scanners*, televisões e monitores, estando dependente do dispositivo utilizado, uma vez que a gama de cores varia consoante o equipamento. Por exemplo, uma imagem aparecerá mais escura utilizando um computador com sistema operativo Windows do que utilizando Mac OS, uma vez que as cores padrão RGB no Windows são mais escuras. [25].

### 2.5.2 Modelos CMY e CMYK

O modelo CMY é baseado nos três pigmentos primários (*Cyan*, *Magenta* e *Yellow*). A maioria dos dispositivos que utilizam o princípio da deposição de pigmentos coloridos em papel, como, por exemplo, impressoras ou fotocopiadoras a cores, requer uma conversão interna do formato RGB para o formato CMY, de acordo com a equação 2.4 [26].

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Este modelo, também dependente do dispositivo utilizado, é um sistema subtrativo de cores, em contraposição ao sistema aditivo RGB (Figura 2.13).

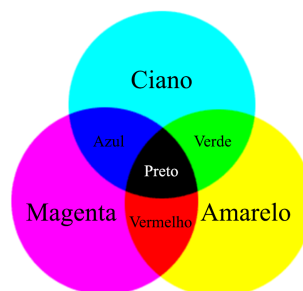


Figura 2.13: Representação da subtratividade do modelo CMY.



A cor preta pode ser produzida misturando os três pigmentos, no entanto, é mais usual adicioná-la ao sistema (passando o modelo a ser chamado de CMYK), por diversas razões. Por um lado, o preto obtido na mistura dos três pigmentos não é puro (apresentado uma coloração violeta ou cinza), por outro, os textos imprimidos a preto contêm muitos detalhes difíceis de se obter mediante a sobreposição das três tintas. Para além disso, o pigmento preto é mais barato do que os restantes pelo que a mistura das três cores sairia mais caro [26].

### 2.5.3 Modelo HSV

O modelo HSV é definido pelas grandezas tonalidade (*Hue*), saturação (*Saturation*) e valor (*Value*). A tonalidade é a cor pura com saturação e luminosidade máximas, que se exprime num valor angular entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ . A saturação indica a maior ou menor intensidade da tonalidade, ou seja, se se trata de uma cor esbatida ou forte (pura), e exprime-se num valor percentual entre 0 e 100%. Uma cor saturada ou pura não contém a cor preta nem a branca. O valor traduz a luminosidade (luz refletida) ou o brilho (luz emitida) de uma cor, ou seja, se uma cor é mais clara ou mais escura, indicando a quantidade de luz que a mesma contém. Por outras palavras, esta grandeza indica a quantidade de preto e também se exprime percentualmente entre 0 e 100% [25,26].

Na figura 2.14 está representado o modelo HSV e as suas componentes.

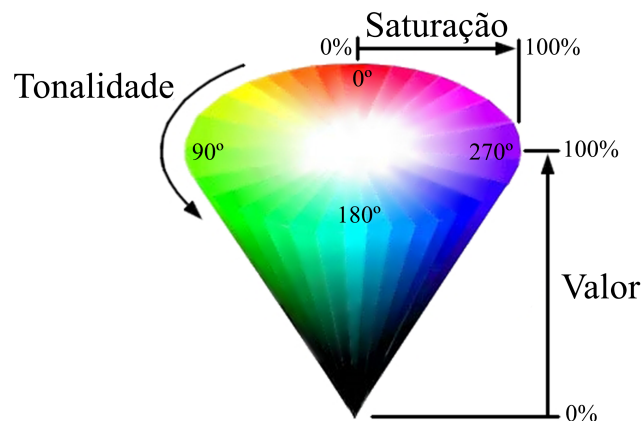


Figura 2.14: Representação esquemática do modelo HSV, evidenciando as tonalidades, saturação e valor da luminosidade.

Este modelo é utilizado na mistura de cores do ponto de vista artístico, pois é mais intuitivo de se utilizar do que o modelo RGB, por exemplo. Os artistas plásticos obtêm as cores das suas pinturas através da combinação da tonalidade com elementos de brilho e saturação e não através de combinações de vermelho, verde e azul [25].

### 2.5.4 Modelo $L^*a^*b^*$

O modelo  $L^*a^*b^*$  é atualmente considerado o modelo padrão para a medição de cores. Este modelo, desenvolvido pela CIE, em 1976, baseia-se numa componente de luminância (representado por  $L^*$ , que vai de 0 a 100), que contém as informações da luminosidade de uma imagem, e em duas componentes cromáticas (que podem tomar valores de -120 a +120): a componente  $a^*$

(de verde a vermelho) e a componente  $b^*$  (de azul a amarelo) [25,26]. A figura 2.15 representa esquematicamente o modelo  $L^*a^*b^*$ .

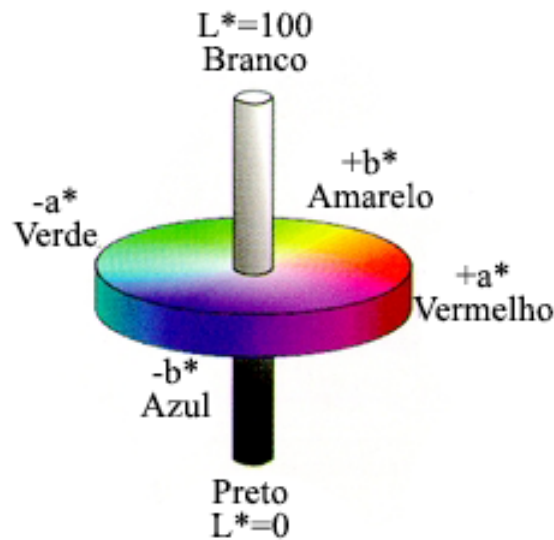


Figura 2.15: Representação esquemática do modelo  $L^*a^*b^*$ .

Este modelo, ao contrário dos modelos RGB e CMYK, é independente do dispositivo utilizado, proporcionando cores consistentes, quer se altere o monitor, a câmara fotográfica, a impressora, ou outro equipamento. Além disso, o modelo  $L^*a^*b^*$  apresenta uma gama maior, permitindo a representação de mais cores que os restantes modelos [25].

## 2.6 Sistema de cores RAL

RAL é um sistema de correspondência de cores usado na Europa, desenvolvido em 1927, na Alemanha.

Este sistema começou a partir de uma tabela de 40 tonalidades. A primeira coleção foi denominada de RAL 840, e permitiu padronizar a descrição de cores na indústria, ao nível das tintas, vernizes e pós. Em 1930, o sistema foi revisto e recebeu o nome de RAL 840 R. Foi novamente revisto em 1961, tendo sido adicionadas novas tonalidades, resultando no RAL 840 HR [27].

Atualmente, o sistema RAL apresenta diversas variantes [27]:

**Sistema RAL Clássico:** este sistema resulta da evolução do sistema de 40 cores iniciais para as 233 que possui atualmente. As cores são identificadas por um sistema de 4 dígitos, em que o primeiro algarismo está relacionado com a sombra da cor.

A tabela 2.4 mostra a gama de cores que se podem encontrar no sistema RAL Clássico e a figura 2.16 exemplifica algumas dessas cores.

Tabela 2.4: Gama de cores presentes no sistema RAL Clássico, com a evidencia da quantidade de tonalidades encontradas em cada cor.

Gama	Nome da gama	Primeira cor	Última cor	Quantidade
RAL 1XXX	Amarelo	RAL 1000	RAL 1037	40
RAL 2XXX	Laranja	RAL 2000	RAL 2013	14
RAL 3XXX	Vermelho	RAL 3000	RAL 3033	34
RAL 4XXX	Violeta	RAL 4001	RAL 4012	12
RAL 5XXX	Azul	RAL 5000	RAL 5026	25
RAL 6XXX	Verde	RAL 6000	RAL 6038	36
RAL 7XXX	Cinzeno	RAL 7000	RAL 7048	38
RAL 8XXX	Castanho	RAL 8000	RAL 8029	20
RAL 9XXX	Branco/Preto	RAL 9001	RAL 9023	14



Figura 2.16: Exemplo de algumas cores presentes no sistema RAL Clássico.

O principal critério para a presença de uma cor nesta classe é o facto de ser de “interesse fundamental”. Assim, a maioria das cores utilizadas por organizações governamentais e em sinais de trânsito utilizam este sistema clássico.

**Sistema RAL F9:** criado em 1984, este sistema é utilizado em camuflagem militar, abrangendo apenas 10 cores.

**Sistema RAL Design:** criado em 1993, apresenta atualmente 1625 cores, identificadas por 7 dígitos, que representam a tonalidade, o brilho e a saturação. Este sistema é utilizado por arquitetos, publicitários e designers.

**Sistema RAL Effect:** este sistema é composto por 420 cores sólidas e 70 cores metálicas. É uma coleção desenvolvida através de tintas à base de água, sem a utilização de metais pesados. É, ainda, considerado um sistema de produção de cor ecológico.

**Sistema RAL Digital:** este sistema, relativamente recente, possui 1882 cores, provenientes dos sistemas Clássico, Design e Effect, e foi criado em computador, nomeadamente para sistemas CAD<sup>6</sup>.

A cada cor RAL do sistema clássico está associada uma coordenada RGB aproximada e um nome característico [28]. A tabela 2.5 apresenta alguns exemplos de cores RAL do sistema clássico, bem como as suas coordenadas RGB correspondentes e a sua designação.

Tabela 2.5: Exemplo de cores RAL, coordenadas RGB e respetivas designações.

<b>RAL</b>	<b>(R,G,B)</b>	<b>Nome</b>
RAL 1026	(255,255,0)	Amarelo brilhante
RAL 3026	(254,0,0)	Vermelho claro brilhante
RAL 5013	(37,41,74)	Azul cobalto
RAL 9010	(255,255,255)	Branco puro

<sup>6</sup>do inglês *Computer Aided Design*. Sistemas CAD são sistemas computacionais utilizados em diversas áreas para facilitar a elaboração de projetos e desenhos técnicos.

## 2.7 Imagem digital

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional,  $f(x, y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais, e a amplitude de  $f$  em qualquer par de coordenadas  $(x, y)$  é chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto [26].

Para converter uma imagem na forma digital é necessário que as coordenadas e os valores de amplitude sejam finitos e discretos. Para tal, tem de se digitalizar as coordenadas, bem como a respetiva intensidade. À digitalização das coordenadas dá-se o nome de amostragem. A digitalização da intensidade denomina-se quantização. Deste modo, quando  $x$ ,  $y$  e os valores da amplitude de  $f$  forem finitos e discretos, obtém-se a chamada imagem digital [20, 26].

Assumindo que é feita a digitalização de uma imagem  $f(x, y)$ , o resultado é uma matriz constituída por  $M$  linhas e  $N$  colunas (eq. 2.5), composta por um número finito de elementos, cada um dos quais com um valor e localização particulares. Comumente, estes elementos são referidos como pixels [12, 26].

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(1, 1) & f(1, 2) & \dots & f(1, N) \\ f(2, 1) & f(2, 2) & \dots & f(2, N) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f(M, 1) & f(M, 2) & \dots & f(M, N) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Os pixels podem conter uma quantidade variável de informação que se divide em bits<sup>7</sup>. Quanto mais bits possuir um pixel, maior a informação nele armazenado e maior qualidade tem a imagem (Figura 2.17) [29, 30].

Uma imagem com um bit por cada pixel acaba por ser uma imagem a preto e branco, com alto contraste, em o valor zero (0) representa a cor preta e o algarismo um (1) representa branco. Uma imagem cujos pixels estão codificados sob a forma de 4 bits cada é traduzida numa escala de cinzas com 16 tons distintos ( $2^4 = 16$  combinações possíveis de bits), já se cada pixel possuir 8 bits cada, a imagem terá 256 tons possíveis de cinzento. As imagens mais comuns são as de 24 bits de cor, que são as imagens em RGB.

<sup>7</sup>É a menor unidade de informação que pode ser armazenada ou transmitida. Um bit apenas pode assumir dois valores: 0 ou 1.

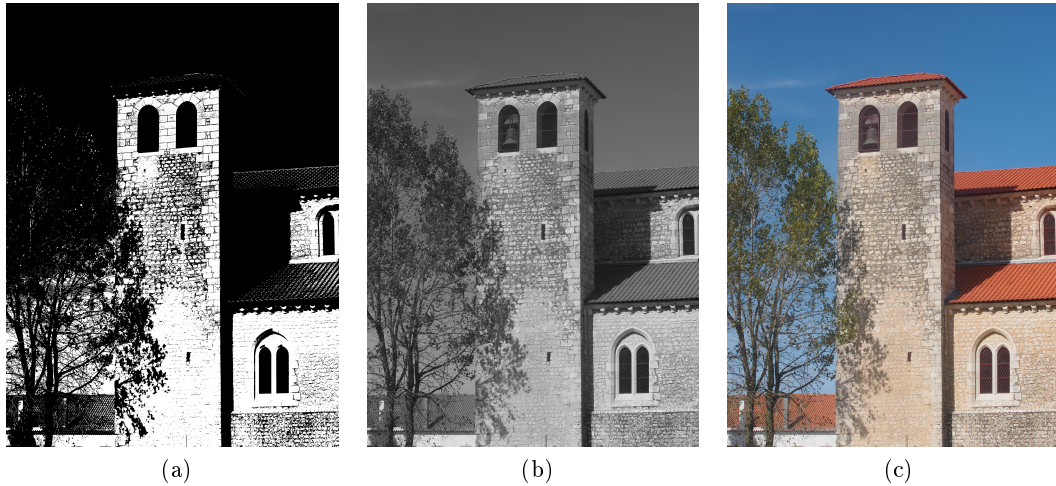


Figura 2.17: Representação de uma imagem digital com: (a) 1 bit, (b) 8 bits e (c) 24 bits.

Numa imagem digital colorida do sistema RGB, um pixel pode ser visto como um vetor cujas componentes representam as intensidades de vermelho, verde e azul. A imagem colorida pode ser vista como a composição de três imagens monocromáticas (Figuras 2.18 e 2.19) e pode ser descrita como na equação 2.6,

$$f(x, y) = f_R(x, y) + f_G(x, y) + f_B(x, y) \quad (2.6)$$

onde  $f_R(x, y)$ ,  $f_G(x, y)$  e  $f_B(x, y)$  representam, respectivamente, as intensidades luminosas das componentes vermelha, verde e azul da imagem, no ponto  $(x, y)$ .

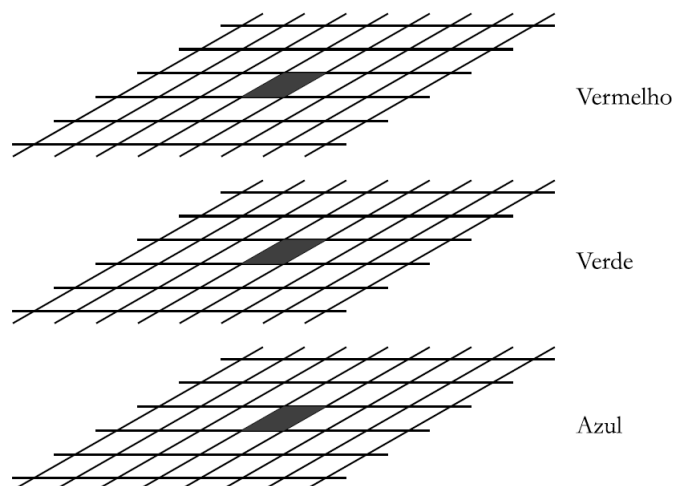


Figura 2.18: Representação esquemática da matriz tridimensional de uma imagem em RGB. Adaptado de [20]



Figura 2.19: Representação gráfica de (a) uma imagem colorida RGB e das suas três componentes: (b) *Red*, (c) *Green* e (d) *Blue*.

## 2.8 Histograma de imagem digital

Um histograma é uma representação da distribuição da frequência de ocorrência de um conjunto de números. O histograma de uma imagem digital é uma ferramenta muito simples e poderosa no processamento de imagens digitais que reflete a relação estatística entre cada nível de cinza e a sua frequência de ocorrência [31].

Os histogramas de uma imagem com  $L$  níveis de intensidade de cinza distintos na gama  $[0, C]$  é definido como na equação 2.7,

$$h(r_k) = n_k \quad (2.7)$$

onde  $r_k$  é o  $k$ -ésimo nível de intensidade e  $n_k$  é o número de pixels cujo nível de cinza é  $r_k$ . Numa imagem a cores,  $C$  toma o valor de 255 [31].

Uma vez que o processamento é efetuado sobre um segmento da imagem digital com dimensões variáveis de amostra para amostra, é necessário normalizar o histograma. Os histogramas normalizados obtêm-se dividindo cada elemento de  $h(r_k)$  pelo número total de pixels da imagem (igual à soma dos elementos do histograma). Um histograma normalizado é também chamado de função de densidade de probabilidades (pdf) e reflete a probabilidade de ocorrer um dado nível de intensidade de cinza (eq. 2.8).

$$p(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (2.8)$$

Com base no comportamento de um histograma, é possível inferir a aparência de uma imagem: numa imagem escura, os níveis de cinza concentram-se mais na extremidade inferior do índice cromático; por outro lado, os pixels de uma imagem bastante luminosa apresentam valores mais elevados; já numa imagem de elevado contraste, os níveis de cinza encontram-se bem distribuídos ao longo de grande parte da gama [20].

Numa imagem a cores, o histograma global é dado pela sobreposição das 3 componentes RGB (Figura 2.20).

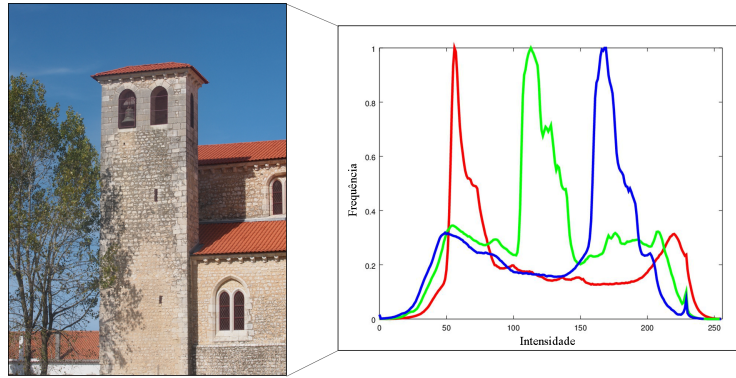


Figura 2.20: Histograma de uma imagem RGB: a vermelho a componente R, a verde a componente G e a azul a componente B.

## 2.9 Etapas do processamento digital de imagens

O processamento digital de imagens é uma técnica que permite a análise de dados multidimensionais, fazendo uso da manipulação de imagens para obter informações que podem conduzir à tomada de decisão. O elemento principal é a imagem ou um conjunto delas, captadas através de um instrumento apropriado como, por exemplo, uma máquina fotográfica digital.

Uma sequência típica do processamento e análise de uma imagem compreende as etapas de aquisição, pré-processamento, segmentação, extração de características e reconhecimento e interpretação (Figura 2.21).

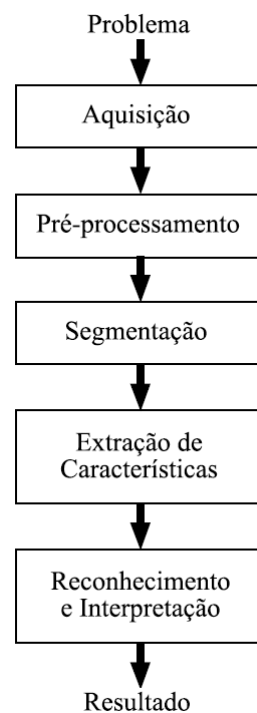


Figura 2.21: Representação esquemática das etapas de análise e processamento de imagem.



## Aquisição

A aquisição de uma imagem é o processo de conversão de uma cena real tridimensional numa imagem digital. O primeiro passo deste processo é a redução da dimensionalidade, efetuada, por exemplo, por uma máquina fotográfica, em que a cena em 3D é convertida numa representação em 2D (Secção 2.7).

Quando são capturadas imagens a cores, é importante ter uma fonte de luz apropriada, uma vez que a cor que o objeto aparenta ter depende da parte do espectro que é refletido por ele e, por isso, da cor da luz emitida pela fonte de radiação. Esta aparência da cor da luz emitida pela fonte de radiação é expressa pela temperatura de cor (em Kelvin). Quanto mais alta a temperatura de cor, mais clara é a tonalidade de cor da luz. Quando se fala em luz quente ou fria, não é tido em conta o calor físico da lâmpada, mas sim a tonalidade de cor que ela irradia [25].

A distribuição de energia espectral da iluminação está normalizada pela CIE e encontra-se representada na figura 2.22.

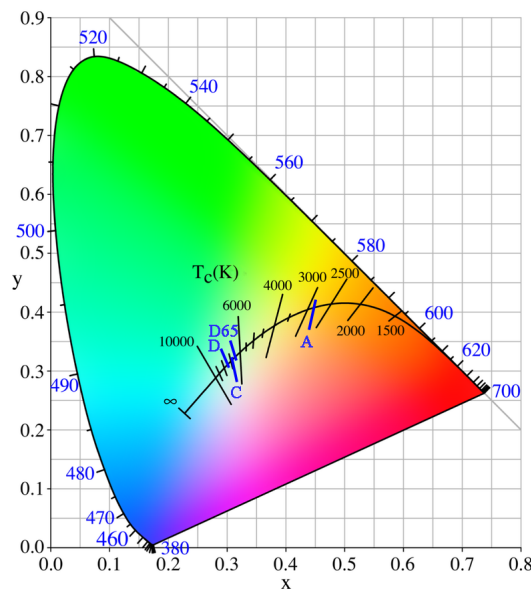


Figura 2.22: Representação esquemática do diagrama cromático desenvolvido pela CIE em 1960.

Com base no diagrama, a CIE definiu várias lâmpadas padrão que são especificadas pelas suas temperaturas de cor. As lâmpadas padrão mais usuais são a A (2856K), a C (6774K), a D65 (6500K) e a D (7500K) [25].

### **Pré-processamento**

O pré-processamento, também conhecido como melhoria de imagem, é usado para corrigir defeitos básicos na imagem, criados durante a sua aquisição. Nesta etapa são realizadas correções de fundo ou de iluminação, realces de borda e redução de ruído, que melhoram a visibilidade das características relevantes da imagem [26].

### **Segmentação**

A segmentação é um termo técnico usado para a discriminação de objetos numa imagem. Após a obtenção das imagens é necessário definir a superfície a analisar. No sentido de melhorar a resolução cromática (perfil do histograma), é importante escolher uma superfície adequada [26]. Para tal, esta deverá ser homogênea (para produzir sinais cromáticos muito próximos e com pouco ruído), representativa de cor do objeto, e não deve apresentar sombras (tendem a deslocar os índices de cor para valores mais baixos), excesso de luminosidade (tendem a deslocar os índices de cor para valores mais elevados), nem reflexos (que resultam em ruído).

A utilização de um programa de edição de imagem torna-se a melhor forma de definir os locais a analisar, facilitando a seleção de secções retangulares.

### **Extração de características**

Após a obtenção de uma imagem pós-processada e determinada a área a analisar, é possível realizar diversas medidas, tais como a determinação do número de objetos presentes, o tamanho, forma, posição, textura e cor de cada objeto na imagem.

A cor é um atributo eficiente e poderoso na avaliação de imagens em diversas áreas. É um parâmetro de qualidade avaliado pelo consumidor e, portanto, é considerado um fator crítico na aceitação de um produto.

Para este projeto procura-se obter estimativas acerca dos índices de cor e, com base nesses valores, efetuar testes de comparação entre uma amostra e o padrão.

Ao analisar uma imagem digital colorida RGB, podemos processar cada uma das três componentes separadamente e, de seguida, avaliar os resultados globais (Figura 2.23).

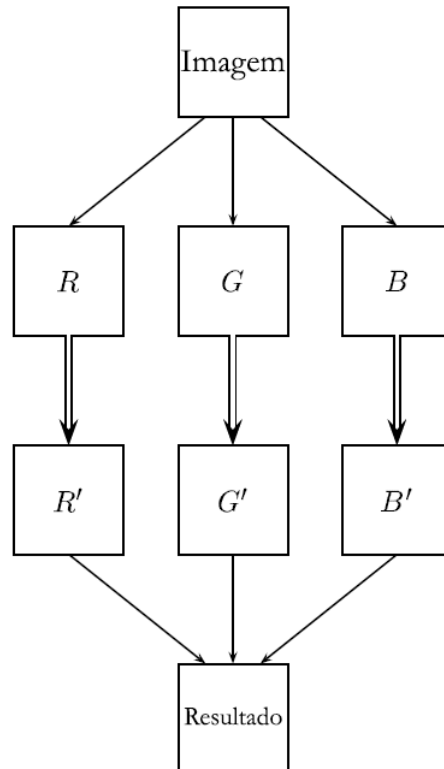


Figura 2.23: Representação esquemática do processamento de uma imagem RGB. *Adaptado de [20]*

Cada plano cromático é representado sob a forma de histograma contendo o número de pixels em função da intensidade de cor. Se a superfície fotografada tiver aspecto homogêneo e uniforme, as distribuições dos índices de cor são afiladas e bem definidas (Figura 2.24a). Se houver uma significativa granulosidade ou outros fenômenos interferentes (tais como, reflexos ou sombras) estas tornam-se mais alargadas e irregulares, podendo apresentar diversos máximos locais (Figura 2.24b).

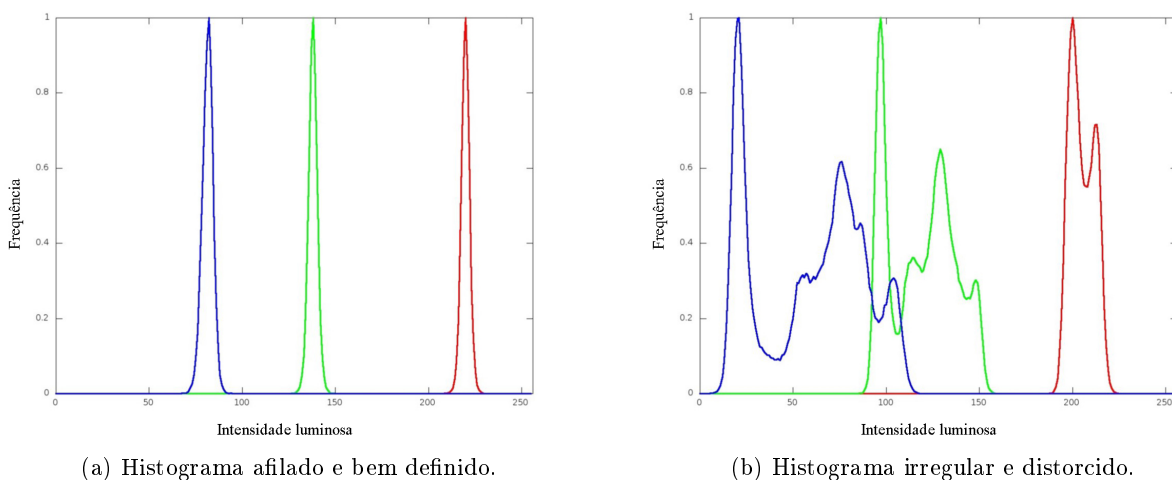


Figura 2.24: Exemplos de histogramas cromáticos (a) sem interferências, resultando num comportamento afilado e bem definido, e (b) com interferências, levando a um perfil distorcido.

## Reconhecimento e interpretação

Esta última etapa tem como objetivo identificar os objetos de forma a poder classificá-los em classes distintas, consoante as suas semelhanças e diferenças. É, assim, o processo de atribuição de um rótulo a um objeto, baseado nas suas características.

### 2.10 Estado da Arte

A utilização de imagens digitais representa uma oportunidade para desenvolver determinações rápidas e diretas para a resolução de diversos problemas.

A aparência superficial e a cor dos produtos são os primeiros parâmetros de qualidade avaliados pelos consumidores, e são, portanto, fatores críticos para a sua aceitação.

Para levar a cabo uma análise de imagem digital é necessário conhecer o valor de cada pixel na superfície de determinado produto. Os colorímetros<sup>8</sup> são uma opção viável para tal análise, no entanto, atualmente, os existentes no mercado apenas medem pequenas áreas, que dificilmente representam o produto.

Uma vez que as câmaras digitais permitem obter informações em pixels, vários estudos têm sido realizados utilizando este equipamento e mostraram-se muito úteis, oferecendo resultados rápidos e precisos. Ao longo dos últimos 10 anos, o processamento digital de imagens tem sido estudado exaustivamente em áreas completamente distintas.

Em 2004, YAM e PAPADAKIS [25] apresentaram um método simples que combina a câmara digital e software fotográfico para medir e analisar a cor de bases de pizzas preparadas em micro-ondas. As pizzas foram aquecidas durante 3.5 minutos na potência máxima do micro-ondas, depois foram tiradas e arrefecidas à temperatura ambiente. Foram realizadas duas análises químicas: qualitativa, para avaliar as pizzas como mais escuro, mais leve e mais atraente e quantitativa para medir a cor das superfícies das pizzas com base no modelo  $L^*a^*b^*$ . O método apresentado revelou ser uma alternativa atraente para medir a cor da superfície dos alimentos devido à sua simplicidade, versatilidade e baixo custo.

Um ano mais tarde, BRIONES e AGUILERA [32] implementaram uma metodologia para avaliar a cor da superfície de chocolates através de imagens digitais. O estudo baseou-se na avaliação das mudanças de cor na superfície de chocolates de leite durante vários dias. A mudança de cor é acompanhada pelo revestimento esbranquiçado em chocolates. As imagens foram adquiridas a partir de uma câmara digital a cada dois dias de armazenamento. O sistema de aquisição esteve sempre sob as mesmas condições controladas de forma a atingir alta uniformidade e repetibilidade no estudo. As cores das imagens foram analisadas com base no modelo  $L^*a^*b^*$  e comparadas com os resultados obtidos por um colorímetro comercial. De acordo com os resultados obtidos, a metodologia implementada mostrou ser adequada para a deteção de mudanças de cor na superfície de chocolates e ainda acompanhar a evolução da cor durante o desenvolvimento do revestimento esbranquiçado.

---

<sup>8</sup>Um colorímetro é um instrumento que caracteriza amostras coloridas, fornecendo uma medida objetiva das características da cor.

PACIORNIK *et al.* [33] desenvolveram, em 2006, uma alternativa para a quantificação do mercúrio em amostras de peixe com base no desenvolvimento de uma reação colorimétrica. Os investigadores utilizaram um *scanner* para capturar as imagens e interpretaram os dados com base nos modelos RGB, CMY e HSL. O modelo RGB apresentou baixa sensibilidade na variação da massa do mercúrio. Por outro lado, os modelos CMY e HSL apresentaram relações lineares com a massa do mercúrio, especialmente os componentes *Magenta* e *Hue*, sendo este último mais sensível.

RASHIDI *et al.* [34] implementaram, um ano mais tarde, uma técnica para a determinação do volume de kiwis, através do processamento de imagens digitais. Para realizar o estudo, foram selecionados 15 kiwis de tamanho aleatório, cujos pesos variavam de 55.3 a 112.3 gramas. O sistema de processamento de imagem consistiu numa câmara digital, uma fonte de luz fluorescente de 40W e um computador pessoal com todos os programas necessários. Na aquisição das imagens, os kiwis foram colocados individualmente sobre uma cartolina branca e sob o ângulo de visão da câmara. Foram capturadas duas imagens: antes e depois de se rodar manualmente o ângulo da câmara a 90°. As imagens foram convertidas em preto e branco para reduzir o tamanho do arquivo e o tempo de processamento. Os autores compararam este método com o método em vigor (método do deslocamento de água<sup>9</sup>), recorrendo ao teste t-emparelhado. Os resultados indicaram que não existiam diferenças significativas entre os dois métodos, uma vez que o valor de prova foi superior a 5%. A técnica de processamento de imagem tornou-se uma boa alternativa para medir o volume de kiwis, apresentando como vantagens o facto de ser rápido, não invasivo e prático.

Em 2008, GODINHO *et al.* [35] propuseram um método para a caracterização de vários tipos de refrigerantes com base na cor, para avaliar as diferenças em relação às falsificações. Neste estudo, foram analisadas 29 marcas de refrigerantes de 3 sabores diferentes. As imagens foram registadas com um *scanner* e tratadas recorrendo ao modelo RGB. As imagens foram classificadas através da Análise de Componentes Principais (PCA). Os resultados comprovaram que esta metodologia pode realmente ser empregue para classificar diferentes marcas de bebidas dentro do mesmo sabor.

LYRA *et al.* [36] apresentaram pela primeira vez, em 2009, um método de espectrometria de emissão de chama baseada na imagem digital. Este método faz uso de uma *webcam* que permite capturar as imagens digitais associadas à radiação emitida pelos analitos na chama. Os valores RGB determinados por este método revelaram ser lineares em relação à concentração de analito. A viabilidade deste processo inovador foi testada em três aplicações que envolveram a determinação de lítio, sódio e cálcio em fármacos anti-depressivos, no soro fisiológico e na água, respetivamente. Aplicando o teste t-emparelhado a 95% de confiança, os autores não encontraram diferenças estatísticas entre este método e a espectrometria tradicional. Adicionalmente, este novo método ofereceu maior sensibilidade e precisão, para além de apresentar limites de deteção e quantificação mais baixos.

Um ano depois, LOPEZ-MOLINERO *et al.* [37] propuseram um método de determinação

---

<sup>9</sup>O método do deslocamento de água tem como objetivo a determinação do volume/densidade de um sólido irregular, utilizando uma proveta cheia de água até um determinado volume,  $V_i$ . De seguida, introduz-se o sólido na proveta anotando-se o valor da subida da água ( $V_f$ ). A diferença entre os volumes permite calcular o volume do sólido introduzido na proveta.

de Ti(IV) em sacos de plástico, com base numa reação colorimétrica, fazendo uso de imagens digitais. As imagens foram adquiridas com uma câmara digital e processadas em Matlab, de modo a gerar as coordenadas RGB. Foram utilizados dois métodos de calibração: linear e com base em redes neurais. Estabeleceu-se a gama analítica entre 2.0 a 30.0  $mgL^{-1}$  e foi usada a componente azul da imagem para determinar a concentração de Ti(IV), por apresentar melhores condições de trabalho. Foram ainda utilizados métodos quimiométricos para analisar melhor os dados. Os resultados foram comparados com o método de referência (ICP-AES<sup>10</sup>) e não foram observadas diferenças significativas. O método desenvolvido mostrou-se rápido e adaptável, com um elevado nível exatidão e precisão.

TÓRRES *et al.* [38] apresentaram, em 2011, um método baseado na imagem digital para determinação da acidez de vinhos tintos, através de titulação ácido-base sem a utilização de um corante indicador. A metodologia proposta baseou-se nas propriedades absorventes do vinho. Foram analisadas 10 amostras de vinho e os resultados foram comparados com o método potenciométrico de referência. De acordo com os autores, o uso de imagens digitais obtidas por uma simples *webcam* pode resultar numa nova estratégia de titulação ácido-base sem a utilização de indicadores ou elétrodos de pH, uma vez que se trata de um instrumento simples e mais barato.

Em 2012, LINKER *et al.* [39] publicaram um estudo sobre uma estratégia para estimar o número de maçãs verdes presentes num pomar, recorrendo a imagens digitais captadas por uma máquina fotográfica. O algoritmo apresentado foi testado de duas maneiras distintas. Na primeira, as imagens foram captadas pela máquina em modo automático em diferentes alturas do dia. Neste caso, apesar do algoritmo ter conseguido detetar corretamente mais de 85% das maçãs visíveis nas imagens, a luz direta e a saturação da cor causaram um grande número de deteções falsas. O segundo conjunto de fotografias foi tirado manualmente e sob luz difusa (pôr-do-sol). Desta maneira, o algoritmo permitiu classificar corretamente 95% das maçãs e a percentagem de falsos positivos ficou abaixo de 5%.

Neste estudo, a deteção de maçãs em imagens RGB obtidas em ambiente natural apresentou duas grandes dificuldades: a luz natural formava sombras e aumentava a saturação das imagens e, para além disso, as maçãs apresentavam tamanhos e cores semelhantes a outros objetos presentes nas fotografias e, raramente, estavam visíveis na sua totalidade, originando erros na deteção. Por outro lado, os dados obtidos foram mais do que satisfatórios e o algoritmo desenvolvido poderá providenciar ao agricultor informação mais fidedigna e sistemática do que a inspeção meramente visual.

No mesmo ano, ULRICI *et al.* [40] utilizaram imagens RGB para detetar defeitos na pele de presuntos crus. Neste estudo foram identificadas e selecionadas, por um painel avaliador especializado, 95 amostras de presunto. As imagens correspondentes foram utilizadas para construir modelos de classificação, utilizando o método dos Mínimos Quadrados Parciais, juntamente com a Análise Discriminante (PLS-DA) e um algoritmo baseado na correspondência/classificação. A seleção das características permitiu uma discriminação de amostras defeituosas utilizando apenas três variáveis, com uma eficácia igual a 97.8%. O método mostrou-se assim capaz de reduzir

---

<sup>10</sup>O método de Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-AES) tem subjacente o fenómeno de excitação de átomos ou iões livres no estado gasoso e a consequente emissão de radiação eletromagnética, ocasionada pelo retorno das espécies excitadas ao seu estado de mais baixa energia, o estado fundamental.

drasticamente o tempo necessário para avaliação dos defeitos, evitando também os principais problemas relacionados com a inspeção humana.

Um ano depois, CHOODUM *et al.* [41] utilizaram um iPhone para quantificar trinitrotolueno (TNT) no solo. A ampla gama linear e os baixos limites de detecção conseguidos foram comparados com os obtidos através de métodos espectrofotométricos. Na análise de amostras de controlo foram conseguidos erros relativos baixos, na ordem dos 0.4%-6.3%. Nas amostras de extratos de solo foi obtida uma boa precisão. Este estudo mostrou um grande potencial no desenvolvimento de um método exato, rápido, portátil e economicamente viável para a quantificação de explosivos, recorrendo apenas a um *smartphone*.

Em 2014, MANICKAVASAGAN *et al.* [42] desenvolveram um estudo cujo objetivo era determinar a eficiência do processamento de imagem na classificação de dados correspondentes à dureza de frutos secos. Foram avaliadas 3 variedades de frutos secos, no total de 3300 amostras. As imagens foram adquiridas por uma câmara e processadas por Matlab. Foram utilizados métodos quimiométricos para classificar cada uma das amostras, que apresentaram uma exatidão acima de 80%. Segundo os autores, este método apresenta grande potencial para ser utilizado na monitorização de dados, no entanto, o desempenho deverá ser estudado noutra tipo de amostras.

Já mais recentemente, no ano passado, MAKLED e TAHOUN [43] utilizaram a tecnologia digital para quantificar a coloração de esporomorfos<sup>11</sup> com o objetivo de avaliar a sua evolução térmica. Os autores captaram imagens digitais de esporomorfos de diferentes idades e contextos geológicos e quantificaram a sua cor, recorrendo ao sistema RGB e aos programas Photoshop e ImageJ. As coordenadas obtidas foram representadas num diagrama ternário, dividido em três domínios, cada um dos quais representando um nível de maturidade. Esta técnica mostrou ser económica, na medida em que não necessita de nenhum equipamento sofisticado, podendo vir a substituir a determinação do poder refletor da vitrinite, técnica utilizada atualmente.

No início deste ano, DUTTA *et al.* [44] desenvolveram uma técnica para classificar a qualidade do peixe após a exposição a pesticidas, recorrendo ao processamento de imagens. Para avaliar a variação na qualidade, os peixes foram expostos ao pesticida durante 7 dias e foi observada a bio-acumulação através de GC-MS<sup>12</sup> e de captura fotográfica. O tecido da guelra foi selecionado como a área a ter em conta no processamento de imagem, tendo sido possível extrair diversas características. A distinção entre peixes com ou sem pesticidas foi feita através de validação cruzada, utilizando a função de Kernel, com uma exatidão de 95% a 100%. Todas as etapas do processo mostraram-se computacionalmente eficientes e exatas. Segundo os investigadores, este método não destrutivo pode ser utilizado para testar a presença de resíduos de pesticidas em peixes e avaliar o seu possível consumo humano. Esta ferramenta poderá ainda promover a sustentabilidade da aquacultura, providenciando a criação de peixes para consumo humano sem pesticidas.

---

<sup>11</sup>Componentes orgânicos das rochas sedimentares.

<sup>12</sup>A Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa é um método que permite separar os componentes de uma mistura e caracterizá-los individualmente. Combinando essas duas técnicas é possível ter tanto uma análise qualitativa como quantitativa e avaliar uma solução contendo uma série de produtos químicos.

## 2.11 Tratamento estatístico de dados

Nos dias de hoje, a estatística aplica-se a praticamente quase todas as áreas de pesquisa e produção. Neste capítulo serão resumidas algumas questões fundamentais referentes ao tratamento de resultados, ao suporte estatístico para a tomada de decisão e ao acompanhamento de procedimentos.

### 2.11.1 Ferramentas da Qualidade

As ferramentas da qualidade são utilizadas para definir, medir, analisar e detetar anomalias que interferem no desempenho dos processos organizacionais. Ajudam a estabelecer melhorias de qualidade.

As ferramentas da qualidade surgiram na década de 50 com base nos conceitos e práticas existentes naquela época, e, a partir daí, têm vindo a ser utilizadas nos sistemas de gestão, através de modelos estatísticos que auxiliam na melhoria dos serviços e processos.

As ferramentas utilizadas na melhoria de processos são: fluxogramas, diagramas de causa-efeito, diagramas de Pareto, cartas de controlo, histogramas, listas de verificação e diagramas de dispersão. Consoante a natureza do problema, é feita a escolha da ferramenta mais adequada, logo, para um problema não é necessário utilizar todas as ferramentas mencionadas.

#### 2.11.1.1 Fluxograma

O fluxograma é uma ferramenta que se destina à descrição de processos. Um processo é uma combinação de equipamentos, pessoas, métodos, ferramentas e matérias-primas que gera um produto ou serviço com determinadas características [45, 46]. Assim, um fluxograma descreve a sequência do trabalho envolvido no processo, tendo como grande vantagem a facilidade de visualização geral do seguimento do método. Na Figura 2.25 é representado o exemplo de um fluxograma.



Figura 2.25: Exemplo de um fluxograma de um algoritmo.



### 2.11.1.2 Folha de verificação

As folhas de verificação são tabelas que facilitam a análise de dados (Figura 2.26). O uso desta ferramenta economiza tempo e evita erros de interpretação dos dados, uma vez que os dados estão mais bem organizados [45].

As folhas de verificação são ferramentas indispensáveis para alcançar a qualidade.

Item	Ocorrências
A	
B	
C	
D	

Figura 2.26: Exemplo esquemático e genérico de uma tabela de verificação.

### 2.11.1.3 Diagrama de Pareto

A origem desta ferramenta deve-se ao italiano Vilfredo Pareto (1848-1923)<sup>13</sup> que observou que, geralmente, cerca de 20% das causas são responsáveis por cerca de 80% dos problemas. Esta regra ficou conhecida como regra dos 20:80 e está na base da construção do diagrama de Pareto [45, 46]. Por outras palavras, esta ferramenta considera que a maior parte das perdas que se fazem sentir são devidas a um pequeno número de defeitos, considerados vitais. Os restantes defeitos, que dão origem a poucas perdas, são considerados triviais, e não constituem qualquer perigo sério. Uma vez identificados os defeitos vitais, deve-se proceder à sua análise, estudo e implementação de processos que conduzam à sua redução ou eliminação.

O diagrama de Pareto pode ser identificado como um gráfico de barras que ordena as frequências de ocorrências, por ordem decrescente. A linha que se encontra sobreposta ao gráfico representa a contribuição cumulativa percentual (Figura 2.27).

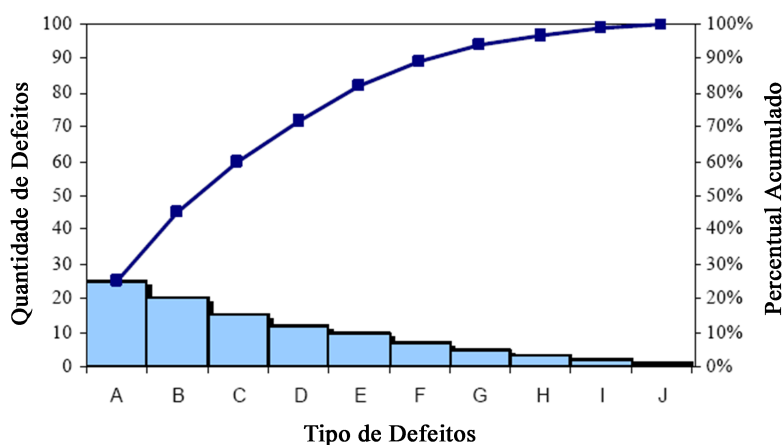


Figura 2.27: Representação esquemática de um diagrama de Pareto.

<sup>13</sup>Formado em engenharia civil, Vilfredo Pareto desempenhou cargos de economista e desenvolveu diversos trabalhos relacionados com a sociologia e a política do início do século XX.

#### 2.11.1.4 Diagrama de causa e efeito

Também conhecido como diagrama de Ishikawa, por ter sido desenvolvido pelo engenheiro japonês Kaoru Ishikawa, em 1953, ou como diagrama «espinha de peixe», devido ao seu formato gráfico, o diagrama de causa e efeito permite visualizar todas as causas associadas a um problema e, posteriormente, analisar e identificar todas as soluções possíveis. Esta ferramenta permite desdobrar grupos generalizados de possíveis causas em níveis mais detalhados adequados à solução do problema.

Este diagrama, tal como ilustra a figura 2.28, é constituído por um eixo principal que representa a sequência dos procedimentos e no qual surge o problema a ser resolvido ou os resultados desejáveis (qualidade, custo e produtividade). Associadas ao eixo principal estão as contribuições primárias que afetam diretamente o parâmetro em estudo. Cada categoria transforma-se, também ela, num eixo principal onde estão ligadas as contribuições secundárias [46].

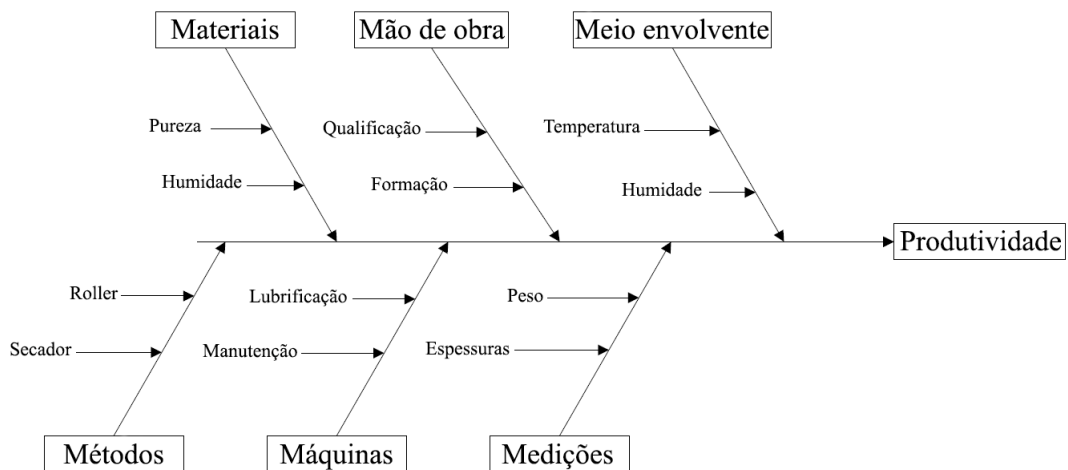


Figura 2.28: Exemplo de um diagrama de causa e efeito aplicado ao processo produtivo da indústria cerâmica.

Este diagrama é um instrumento de análise que permite identificar os requisitos do sistema. Caracteriza-se por oferecer uma perceção de todos os fatores que afetam o sistema e exigir um maior esforço para encontrar soluções que minimizem ou evitem os problemas associados, envolvendo todos os intervenientes do processo e promovendo maior conhecimento por parte de cada um [45, 46].

#### 2.11.1.5 Histograma

Inventado em 1833 pelo francês A. M. Guerry, o histograma consiste num gráfico de barras que mostra a evolução de uma medida num grupo de dados, através da distribuição das frequências (Figura 2.29). Por outras palavras, um histograma permite visualizar facilmente o comportamento de uma dada característica em estudo [45].

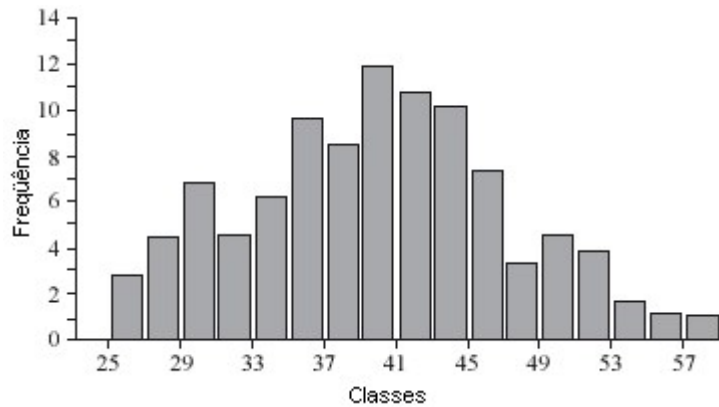


Figura 2.29: Exemplo esquemático de um histograma.

### 2.11.1.6 Carta de controlo

As cartas de controlo permitem determinar a existência de causas assinaláveis de variação, sempre que o valor da estatística amostral se encontre fora dos limites de controlo [45]. Por outras palavras, esta ferramenta permite verificar se o processo está sob controlo ao longo do tempo.

Para colocar um processo sob controlo é necessário analisar todos os desvios significativos que ocorram nesse mesmo processo, identificando claramente as suas causas e resolvê-las sempre que possível. Quando os problemas terão sido eliminados, ou apenas ocorram algumas variações esporádicas, o processo diz-se sob controlo [45].

Na indústria, os limites de controlo são inferiores aos limites máximos da especificação do produto, para possibilitar o controlo do processo antes deste atingir valores não conformes. Com esta ferramenta torna-se possível antecipar e eliminar os erros.

A carta de controlo tem como vantagem principal a sua simplicidade, o que permite a sua utilização por parte de qualquer operador. Com esta ferramenta os operadores conseguem saber se devem ou não intervir no processo. Para além disso, esta ferramenta é vital no processo de melhoria da qualidade, uma vez que reduz a variabilidade normal, permitindo a utilização de uma linguagem comum, quer entre colaboradores, turnos, fornecedores e clientes.

Na figura 2.30 está representado o aspeto de uma carta de controlo, com a identificação dos limites superior e inferior (LSC e LIC, respetivamente) e da estimativa central (LM).

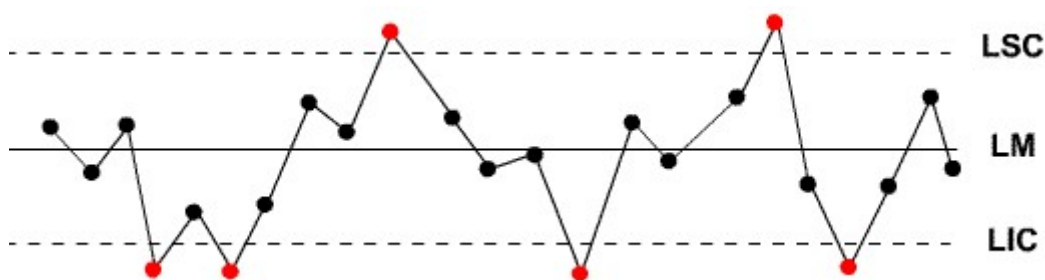


Figura 2.30: Exemplo de uma carta de controlo, evidenciando o posicionamento dos valores obtidos em relação à linha central (LM) e aos valores limites superior (LSC) e inferior (LIC), que definem a respetiva região de controlo.

### 2.11.1.7 Gráfico de dispersão

Os gráficos de dispersão permitem visualizar a interdependência entre duas grandezas (Figura 2.31). Tal interdependência poderá (a) inexistir, não sendo possível identificar qualquer tipo de comportamento típico no gráfico; (b) ser linear, no gráfico os pontos tenderão a distribuir-se ao longo de uma reta; (c) caracterizar-se como não linear, os dados tenderão a distribuir-se ao longo de uma curva, ou de várias curvas similares que se repetem periodicamente; (d) caracterizar outras distribuições como, por exemplo, em agrupamentos bem delimitados [46].

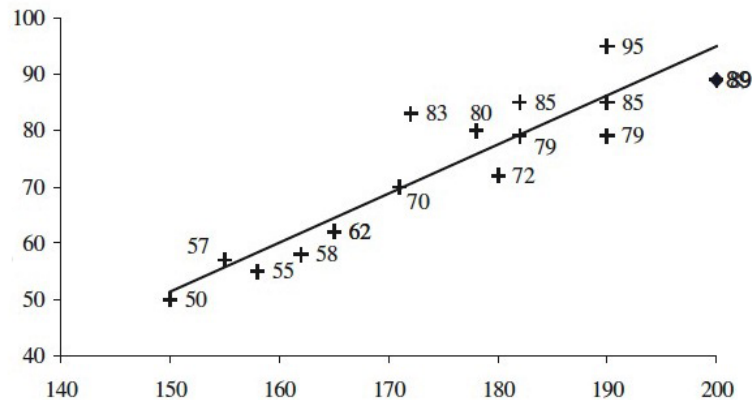


Figura 2.31: Exemplo de um gráfico de dispersão, que permite avaliar a interdependência entre quaisquer duas variáveis em estudo.

### 2.11.2 Testes estatísticos

Quando se pretende estudar o comportamento probabilístico de um dado valor, aplica-se um teste de hipóteses. Este procedimento permite decidir se um dado teste estatístico é ou não suportado pela informação fornecida pelos dados de uma amostra. A tomada de decisão sobre um único dado pode afetar a análise, uma vez que há grande possibilidade de cometer erros de juízo.

#### 2.11.2.1 Nível de confiança e nível de significância

Ainda que a estimativa central esteja concordante com o valor considerado correto, há sempre uma certa margem de possibilidade de se cometer um erro na avaliação, devido à componente aleatória intrinsecamente envolvida na quantificação. Um teste estatístico é sempre um evento binomial, onde existe uma hipótese nula ( $H_0$ ) e uma hipótese alternativa ( $H_1$ ) que lhe é complementar (eq. 2.9).

$$p[H_0] + p[H_1] = 1 \quad (2.9)$$

A hipótese nula é concebida no sentido da igualdade e é aceite por defeito, sempre que não for demonstrada a sua falsidade.

Assim sendo, podem ocorrer três situações no que diz respeito à decisão estatística sobre a validade das hipóteses em estudo: (1) a decisão tomada está correta; (2) é feita uma rejeição

abusiva; (3) é feita uma aceitação abusiva. Estas duas últimas situações representam os erros estatísticos que podem ser cometidos.

O erro poderá ser por excesso, referindo-se a uma falsa rejeição. A este erro dá-se o nome de erro do tipo I ( $\alpha$ ) - a hipótese nula estava correta e foi abusivamente rejeitada por ter sido considerada falsa.

Por outro lado, também pode ocorrer um erro por defeito, que corresponde a uma falsa aceitação. Este erro designa-se por erro do tipo II ( $\beta$ ) - a hipótese nula estava errada e foi abusivamente aceite como verdadeira.

Na figura 2.32 estão representados esquematicamente estes dois tipos de erros.

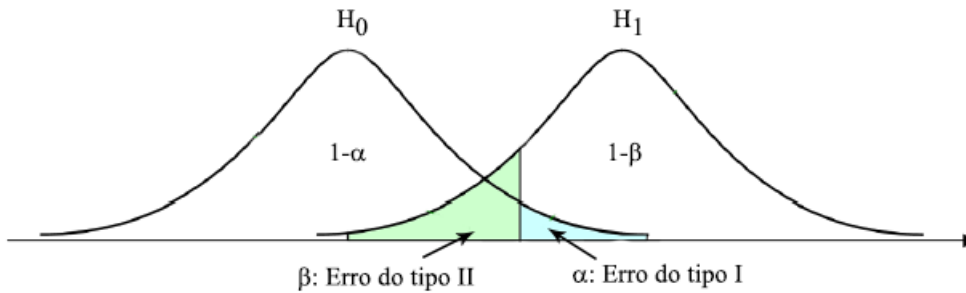


Figura 2.32: Representação gráfica dos erros de tipo I e tipo II.

Por uma questão de segurança estatística, é preferível cometer um erro por rejeição abusiva (erro do tipo I) do que um erro devido a uma aceitação abusiva (erro do tipo II).

A probabilidade máxima com que se pretende proceder à rejeição abusiva é designada de nível de significância do teste e é designada de  $\alpha$ . A probabilidade de aceitação da hipótese correta designa-se por nível de confiança e corresponde à probabilidade de  $(1 - \alpha)$ . À probabilidade de aceitação da hipótese nula dá-se o nome de valor de prova,  $p[H_0]$ .

Na formulação de hipótese estatísticas, a hipótese nula ( $H_0$ ) deve ser formulada no sentido de não haver diferença significativa, isto é, de pertencer ao grosso da distribuição  $(1 - \alpha)$ . A hipótese alternativa ( $H_1$ ) encontra-se direcionada para a diferença significativa ( $\alpha$ ), o complemento da hipótese nula.

### 2.11.2.2 Procedimento

Os testes estatísticos constituem uma ferramenta para, com critérios estatísticos, auxiliar a tomada de decisões na interpretação de resultados.

Os testes estatísticos devem ser efetuados com base num procedimento padrão, que passa pelas seguintes etapas:

#### 1. Formulação do problema

Deve-se fazer uma análise do evento de forma a racionalizar a questão e poder testar.

#### 2. Escolha do teste

O teste é escolhido de acordo com o objetivo pretendido, ou seja, com base na distribuição

estatística que se adequa melhor<sup>14</sup>.

### 3. Hipóteses de trabalho ( $H_0$ e $H_1$ )

As hipóteses devem ser complementares e de forma a abranger todo o espaço amostral. A hipótese nula ( $H_0$ ) deve ser formulada no sentido de não haver diferença significativa (está tudo correto). A hipótese alternativa ( $H_1$ ) incide sobre a diferença significativa (procura mostrar a não conformidade).

### 4. Simetria do teste

A simetria depende do modo como as hipóteses foram formuladas. Se o que se pretende é um teste de desigualdade (superior ou inferior a um determinado valor), apenas se está interessado em considerar um extremo da distribuição como referência e, por isso, o teste estatístico tem uma simetria unilateral. Pelo contrário, se o que se pretende é um teste de igualdade (igual ou diferente de determinado valor), deve-se comparar a parte central da distribuição com determinada estimativa, através de um teste bilateral.

### 5. Nível de Confiança

Antes de se proceder a qualquer cálculo, deve ser estabelecido o nível de significância com que se pretende tirar conclusões. Regra geral, o nível de significância refere-se a  $\alpha = 0.05$ , podendo também ser reduzido para  $\alpha = 0.01$ .

### 6. Cálculo do valor do teste (TV)

Calcula-se com base na expressão da distribuição estatística correspondente.

### 7. Comparação com o valor crítico

Os valores críticos estão tabelados de acordo com o nível de significância e com o número de graus de liberdade. Estes valores permitem definir as regiões de aceitação e de rejeição das hipóteses formuladas.

### 8. Conclusão

No caso do valor experimental ultrapassar os limites tabelados diz-se que, a um determinado nível de confiança, há diferença significativa e a hipótese nula deve ser rejeitada em detrimento da hipótese alternativa. Por outro lado, se o valor do teste for inferior ao valor tabelado, a hipótese nula é aceite, uma vez que não existe evidência estatística de que esta possa ser rejeitada.

Nas secções seguintes são destacados alguns testes fundamentais para a análise dos resultados obtidos neste projeto.

#### **2.11.2.3 Teste de Grubbs**

Muitas vezes, num conjunto de resultados obtidos experimentalmente, existem alguns valores discrepantes que afetam significativamente as estimativas obtidas. Assim, antes de se efetuar qualquer cálculo de estimativa, é necessário proceder à identificação e remoção desses valores, também denominados de *outliers*.

---

<sup>14</sup>As distribuições estatísticas mais comuns são a normal (Gaussiana), de t-student, de F-Fisher e a Qui-quadrado.

O teste de Grubbs é um teste estatístico utilizado para analisar a dispersão de valores dentro de uma dada medição. De uma forma geral, este teste permite verificar a existência de valores discrepantes nas extremidades do conjunto. Assim, neste teste, os valores extremos das réplicas das amostras (máximo e mínimo) são comparados com a média. A hipótese nula determina que o valor em estudo não é um *outlier* e, por isso, pertence ao conjunto. Por outro lado, a hipótese alternativa indica que o valor extremo é discrepante e deve ser eliminado. O valor do teste é determinado pela equação 2.10,

$$G = \frac{|x? - \bar{x}|}{s_x} \quad (2.10)$$

onde  $x?$  é o valor suspeito,  $\bar{x}$  é a média das réplicas da amostra e  $s_x$  é o desvio padrão.

Depois de determinado o valor de  $G$ , este é comparado com o valor crítico tabelado (Anexo A.1). Se o valor calculado ( $G$ ) exceder o respetivo valor crítico de Grubbs, estimado para o nível de confiança de 95% e para uma determinada dimensão da amostra ( $G_{0.05(n)}$ ), a hipótese nula não é válida. Deste modo, o valor suspeito deve ser eliminado, avaliando novamente o valor que mais se afaste da média, até a amostra não apresentar mais valores discrepantes. Só depois de se efetuar este teste é que é possível obter as estimativas da amostra, isto é, torna-se possível calcular a média das réplicas.

#### 2.11.2.4 Teste *t-Student*

Quando está em causa a comparação de estimativas de posição, assumindo que se trata de distribuições normais e independentes, calcula-se o valor de teste apresentado na equação 2.11,

$$TV = \frac{|\bar{x} - \mu|}{\sigma_{\bar{x}}} \quad (2.11)$$

em que  $\bar{x}$  é a média das réplicas da amostra,  $\mu$  é o valor de referência e  $\sigma_{\bar{x}}$  é o desvio padrão da média.

O valor calculado é comparado com o valor crítico tabelado (Anexo A.2).

Neste teste, a hipótese nula assume a igualdade de valores ( $\bar{x} = \mu$ ) e a hipótese alternativa assume a sua diferença ( $\bar{x} \neq \mu$ ). Caso TV seja inferior ao valor crítico, a hipótese nula é considerada aceite e, portanto, não existem diferenças estatísticas entre o valor em estudo e a referência. Por outro lado, se o valor de teste for superior ao valor crítico, a hipótese alternativa é a correta e os valores são estatisticamente diferentes.

#### 2.11.2.5 Teste de Cochran

O teste de Cochran permite detetar valores extremos de variâncias por comparação simultânea com as obtidas em diversas amostras, fazendo uso da razão entre o extremo de variância e a soma de todas as variâncias das amostras. O valor do teste é, então, determinado pela equação 2.12,

$$C = \frac{s_{max}^2}{\sum_{i=1}^n s_i^2} \quad (2.12)$$

onde  $s_i^2$  são todas as variâncias das  $n$  amostras e  $s_{max}^2$  é a variância máxima encontrada.

O valor calculado é depois comparado com o valor crítico tabelado (Anexo A.3). Um valor calculado maior que o valor crítico indica que as variâncias são significativamente diferentes e há problemas potenciais para testes subsequentes como, por exemplo, ANOVA.

### 2.11.2.6 Análise de Variância

A análise de variância (ANOVA) é uma ferramenta estatística importante na qual a variância global observada é dividida em diversas componentes ou contribuições. A ANOVA consegue estimar e diferenciar a contribuição puramente aleatória ( $SS_{pe}$ ) e a contribuição sistemática entre amostras ( $SS_A$ ), dentro da variabilidade total de diversos conjuntos de valores experimentais ( $SS_T$ ) (Tabela 2.6). Deste modo, é possível estudar a influência das amostras (ou fatores) na característica de interesse e, ainda, verificar se elas exercem um efeito significativo de tal modo que se sobreponham à componente puramente aleatória, contribuindo para diferenças significativas entre si.

A ANOVA assenta em três pressupostos básicos: (1) as amostras são aleatórias e independentes; (2) as distribuições são normais e independentes; (3) as variâncias são homogêneas (verificado pelo teste de Cochran, secção 2.11.2.5).

Se um fator A em estudo não influir de modo significativo, ambas as dispersões são estimativas da variância da componente aleatória. Já se o fator influir de modo significativo, a dispersão devida ao fator ( $s_A$ ) torna-se superior à componente puramente aleatória ( $s_{pe}$ ).

A comparação das dispersões é feita com recurso ao teste *F-Fisher*. A hipótese nula assume que não existe efeito do fator ( $H_0 : s_A^2 \leq s_{pe}^2$ ) e esta será validada se se verificar a equação 2.13,

$$TV = \frac{s_A^2}{s_{pe}^2} \leq F_{0.05(N-1, N(M-1))}^u \quad (2.13)$$

onde  $F_{0.05}^u$  representa o valor crítico unilateral tabelado a  $\alpha = 0.05$ , nos graus de liberdade  $N-1$  e  $N(M-1)$ .

A construção de uma tabela de resultados da ANOVA é dada pela tabela 2.6, no entanto, neste projeto, foi utilizado o pacote de ferramentas estatísticas incluído no *Microsoft Office Excel*, que permitiu facilitar a análise.

Tabela 2.6: Construção da tabela de resultados da ANOVA.

Fonte de variação	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Variância	TV
<i>Entre grupos</i>	$SS_A = M \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{x}_i - \bar{X})^2$	$N - 1$	$s_A^2 = \frac{SS_A}{(N-1)}$	$\frac{s_A^2}{s_{pe}^2}$
<i>Dentro de grupos</i>	$SS_{pe} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$	$N(M - 1)$	$s_{pe}^2 = \frac{SS_{pe}}{N(M-1)}$	
<i>Total</i>	$SS_T = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (x_{ij} - \bar{X})^2$	$(N \cdot M - 1)$		

### 2.11.3 Análise de agrupamentos

A análise de agrupamentos é uma técnica não supervisionada utilizada para identificar as similaridades entre indivíduos ou casos e entre variáveis ou descritores, tendo como objetivo



organizar informações disponíveis sobre os casos ou variáveis de modo a reuni-los em grupos discretos e relativamente homogêneos, assim como distinguir heterogeneidade ou descontinuidades entre eles [47].

Existem várias técnicas de agrupamento como, por exemplo, o agrupamento divisivo, o agrupamento baseado em densidade e o agrupamento hierárquico. Este último baseia-se em sucessivas divisões do conjunto de dados e o resultado final pode ser representado na forma de dendrograma (ou diagrama de árvore) (Figura) [48, 49].

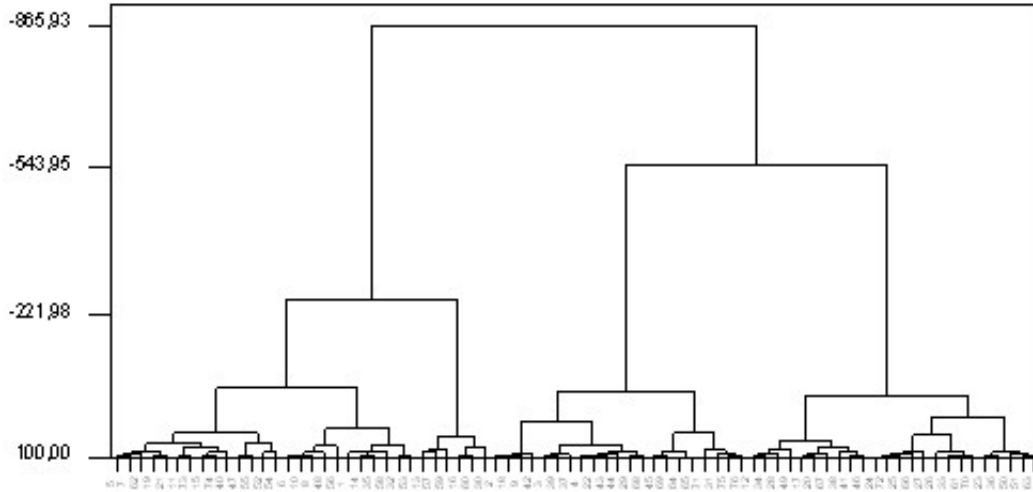


Figura 2.33: Exemplo de um dendrograma.

Na análise hierárquica de agrupamentos (HCA) há que ter em conta o tipo de medida de similaridade entre os objetivos ou grupos, e o método de ligação (aglomerativa ou divisiva).

Para medir a similaridade, costuma-se avaliar a distância entre os pares de objetos: os objetos que possuem a menor distância entre si são mais semelhantes do que os objetos com a maior distância. Essa medida de semelhança pode ser fornecida por diversas fórmulas como, por exemplo, as de Mahalanobis, Chebychey, Euclidiana Quadrada e a Euclidiana [49].

A distância Euclidiana é a medida de distância mais utilizada para a análise de agrupamentos. Considerando o caso mais simples, no qual existem  $n$  indivíduos com  $p$  variáveis cada, a distância Euclidiana entre eles é obtida mediante o teorema de Pitágoras, para um espaço multidimensional [47], segundo a equação 2.14.

$$d(i, j) = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2 + \dots + (x_{in} - x_{jn})^2} \quad (2.14)$$

A distância Euclidiana, quando estimada a partir das variáveis originais, apresenta a inconveniência de ser influenciada pela escala de medida, pelo número de variáveis e pela correlação existente entre as mesmas. Para contornar esse problema, faz-se a padronização das variáveis em estudo, para que possuam variância igual à unidade.

O procedimento hierárquico aglomerativo tem início com cada objeto num grupo separado. Os grupos são combinados sequencialmente, dos mais similares para os menos, acabando por formar um único grupo com todos os objetos [47].

O método da ligação simples (*single linkage*) baseia-se na associação direta entre objetos ou

agregados que se encontram mais próximos (Figura 2.34). Os dois primeiros objetos agrupados são os que apresentam menor distância entre si. Identifica-se a menor distância agrupando-se o terceiro objeto com os dois primeiros, ou formando um novo grupo de dois objetos. Em cada passo, a distância entre dois grupos é definida como a distância entre os seus pontos mais próximos e dois grupos podem incorporar-se através da ligação mais curta entre eles. Continua-se o processo até que todos os objetos pertençam a um único grupo [47,50].

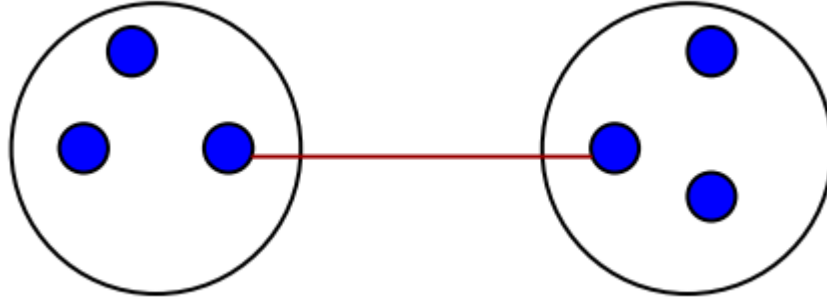


Figura 2.34: Distância entre grupos obtida através da menor distância (*single linkage*).

## Capítulo 3

# Metodologia Experimental

O processamento de imagem é uma área caracterizada pela necessidade de um trabalho experimental alargado para estabelecer a viabilidade dos resultados propostos para um dado problema.

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados, os métodos desenvolvidos e os ensaios realizados.

### 3.1 Materiais e Métodos

Nesta secção são referenciados os materiais utilizados para a captura de imagem e as ferramentas desenvolvidas para o seu correto processamento.

#### 3.1.1 Sistema de iluminação e captura de imagem

O sistema de iluminação utilizado neste projecto (Figura 3.1) é composto por uma caixa de  $42 \times 30 \times 36.5$  cm, opaca à luz, com superfícies internas pretas e brancas, e com duas lâmpadas D65 (29 cm de comprimento e modelo T5-8W) colocadas na parte superior da caixa, num ângulo de  $45^\circ$ , de maneira a maximizar a reflexão difusa responsável pela cor. Na face superior da caixa existe um orifício para posicionar a lente da máquina fotográfica paralela à superfície a fotografar.



Figura 3.1: Vista geral do sistema de iluminação utilizado.

A máquina fotográfica é da marca Canon, modelo PowerShot A3350 IS, de 16 Megapixeis. As definições utilizadas encontram-se descritas na tabela 3.1. O flash da máquina foi desativado para melhorar a consistência das condições de iluminação. O sistema foi ligado 15 minutos antes da captura das fotografias, para estabilização da iluminação. Após a sua aquisição, as imagens foram transferidas para o computador através do cartão de memória.

Tabela 3.1: Estado das definições presentes na câmara fotográfica aquando as capturas.

<b>Modo</b>	<i>Live</i>
<b>Zoom Digital</b>	<i>Off</i>
<b>Zoom Ponto-AF</b>	<i>Off</i>
<b>Servo AF</b>	<i>Off</i>
<b>Luz Aux. AF</b>	<i>Off</i>
<b>Info. Revisão</b>	<i>Off</i>
<b>Detecção piscar</b>	<i>Off</i>
<b>Modo Exibição</b>	<i>Off</i>
<b>Modo Estabilização</b>	<i>Contínuo</i>
<b>Data do Selo</b>	<i>Off</i>

No sentido de minimizar os erros de avaliação da comparação cromática entre as amostras e o padrão, este último foi sempre fotografado nos diversos dias de captura, em triplicado.

### 3.1.2 Pré-processamento

Como já foi referido na secção 2.9, o pré-processamento permite realizar diversas correções nas imagens adquiridas.

Neste projeto, quando necessário, foi efetuada a correção da iluminação. Esta pode fazer-se através da existência de referências de cor (preto e branco) presentes no campo visual da câmara aquando a aquisição da imagem. A conversão da cor fez-se através da equação 3.1,

$$i_C^* = \left( \frac{255 - 0}{i_{Wt} - i_{Bk}} \right) \cdot (i_C - i_{Bk}) \quad (3.1)$$

onde  $i_C$  e  $i_C^*$  representam, respetivamente, a cor original e a corrigida,  $i_{Wt}$  a cor da referência branca e  $i_{Bk}$  a cor da referência preta.

O cálculo desta correção foi efetuado computacionalmente através de *scripts* desenvolvidos especificamente em Octave/Matlab.

### 3.1.3 Segmentação

Para facilitar a seleção de regiões nas imagens a analisar, foi utilizado o programa de edição de imagem GIMP (*GNU Image Manipulation Program*).

O programa GIMP possui os recursos necessários para ser utilizado na criação ou manipulação de imagens e fotografias. Este permite a criação de gráficos e logótipos, o redimensionamento de imagens e a remoção de partes indesejadas, a alteração de cores e a combinação de imagens. Para além disso, permite ainda converter arquivos entre diferentes formatos de imagem digital.

Neste projeto, o programa foi utilizado apenas para a obtenção das coordenadas que permitem o pré-processamento e segmentação de cada uma das fotografias (Figura 3.2).

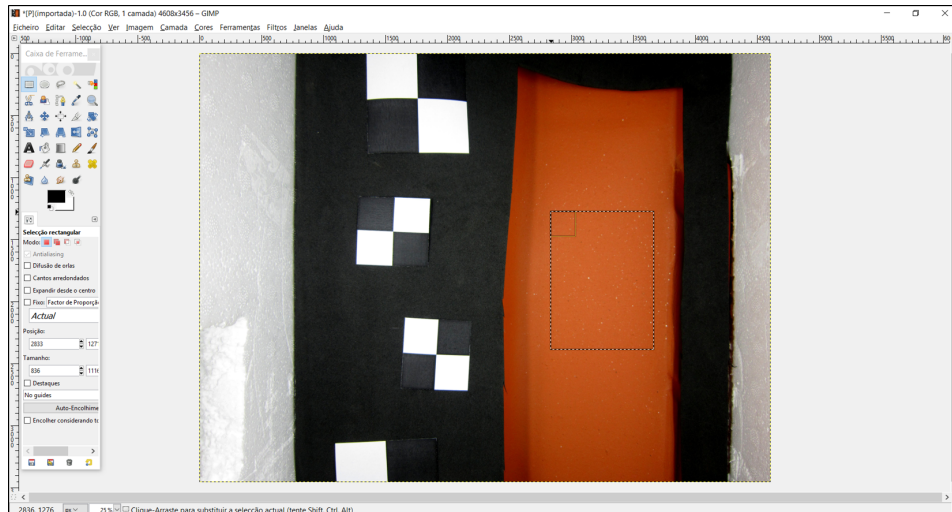


Figura 3.2: Programa GIMP (versão 2.8), onde é evidenciada a seleção de uma região para amostragem digital da imagem.

### 3.1.4 Extração de características

Com base nas coordenadas obtidas no programa GIMP, o Octave/Matlab permite determinar características de uma dada imagem.

Para o processamento digital de imagem, foram utilizados diversos *scripts* com algoritmos desenvolvidos para quantificar a cor, representar histogramas e outros gráficos.

Foram também elaborados programas Octave/Matlab que permitiram calcular o grau de conformidade entre cores.

Uma vez que as distribuições de cor podem não ser uniformes, a melhor forma de comparar cores é através da comparação direta de histogramas normalizados (Secção 2.8). Essa comparação pode ser efetuada através do cálculo da área de sobreposição dos histogramas, como representado na figura 3.3.

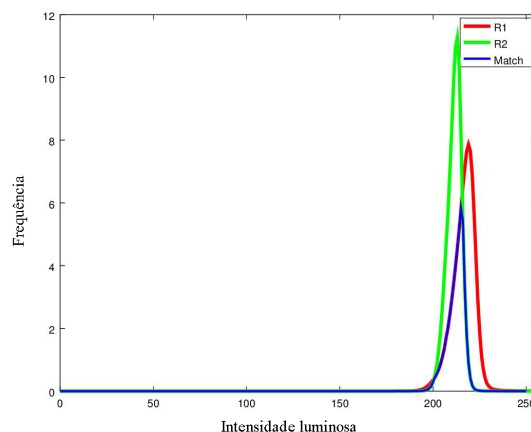


Figura 3.3: Representação gráfica de dois histogramas (a verde e a vermelho) e a sua sobreposição (a azul).

A área (*match*) é definida ao comparar os valores de cada distribuição cromática e assumir o valor mínimo comum como o valor concordante. O *match* cromático resulta do integral do

histograma que contém a área sobreposta comum.

A comparação deve, assim, ser feita ao nível de cada plano cromático e também em termos globais. Neste caso, a concordância de cor significa que tem de haver coincidência simultânea dos três tons R, G e B, expressos sob a forma da sobreposição simultânea das 3 distribuições com os respetivos índices de cor.

Assim, o modo de cálculo do *match* passou por (a) normalizar cada uma das áreas dos histogramas cromáticos, (b) efetuar a comparação de cada um dos planos cromáticos, isto é, sobrepor os dois histogramas, determinar a área comum e calcular a sobreposição relativa, e (c) estimar a sobreposição relativa global através da probabilidade global simultânea, como apresentado na equação 3.2,

$$p(RGB) = (p(R) \times p(G) \times p(B))^{\frac{1}{3}} \quad (3.2)$$

onde  $p(R)$ ,  $p(G)$  e  $p(B)$  representam a sobreposição relativa dos planos cromáticos  $R$ ,  $G$  e  $B$ , respetivamente.

## 3.2 Ensaios

Nesta secção são explicados os diferentes ensaios realizados de modo a otimizar o sistema de iluminação, bem como aqueles efetuados para caracterizar as telhas produzidas e comparar as suas tonalidades com a do padrão.

### 3.2.1 Ensaios preliminares

Para otimizar a captura das imagens, foram realizados diversos ensaios preliminares. Começou-se por avaliar a captura numa sala com iluminação artificial e com janelas, seguindo para um sistema fechado e sem iluminação exterior. Avaliaram-se, também, imagens capturadas com a máquina em diversas distâncias e ângulos. Para além disso, foi também tido em conta o número de lâmpadas a serem utilizadas no sistema.

Após a otimização do sistema de captura, foi também avaliada a necessidade de se efetuar a correção da iluminação.

### 3.2.2 Avaliação da homogeneidade da iluminação

Apesar de no passo de pré-processamento se efetuar a correção da iluminação (Secção 2.9), se esta não for homogénea ao longo da imagem, poderá existir um erro no processamento e quantificação da cor. Para evitar possíveis interferências na amostragem, foi então avaliada a homogeneidade da iluminação. Para tal, foram analisadas 3 fotografias correspondentes a tonalidades diferentes e dias diferentes, de modo a averiguar se o comportamento da iluminação seria constante quer com a variação de cor, quer com a alteração do dia da captura. Segmentou-se, então, a área total das imagens em 8 secções de dimensões iguais, que foram numeradas e comparadas entre si, segundo a análise de agrupamentos, a análise de variâncias e o método definido na secção 3.1.4.

### 3.2.3 Caracterização cromática das telhas

De modo a determinar as características cromáticas das telhas UM Lusa e Advance Premium Lusa, foram recolhidas telhas destas gamas cujas cores eram consideradas padrão e cujo acabamento era homogêneo. Assim, foram recolhidas duas telhas da gama UM e 10 telhas da gama Advance. Estas telhas foram fotografadas e processadas, de modo a determinar as suas características cromáticas, coordenadas RGB de cada uma das cores e os seus perfis cromáticos.

Apesar de poderem ser representados histogramas dos índices cromáticos como forma de caracterização, estes apresentam, frequentemente, assimetrias e tendência para a não normalidade, impedindo a correta determinação de cor de uma imagem. Assim, é mais correto utilizar a mediana (percentil 50%) como estimativa central, doravante denominada como coordenadas RGB.

### 3.2.4 Determinação da cor RAL das telhas

Para determinar que cor RAL se assemelha à cor de cada uma das telhas em estudo, foi utilizada uma paleta do sistema de cores RAL Clássico (*Multimix International*, Alemanha), semelhante à representada na figura 3.4. Cada telha padrão foi fotografada juntamente com as cores da paleta que se assemelhavam à cor de cada telha. As imagens foram processadas e as cores comparadas de acordo com o processo descrito na secção 2.9.



Figura 3.4: Exemplo de uma paleta RAL Clássico.

### 3.2.5 Visão humana vs. processamento digital de imagens

Para avaliar as diferenças que possam existir entre a inspeção visual humana e o processamento digital de imagens, foi constituído um painel de 5 avaliadores (experientes e não experientes, identificados de 1 a 5) que avaliaram, em termos de conformidade da cor, um conjunto de 8 telhas UM Lusa recolhidas e identificadas previamente (A a H).

Os avaliadores deram o seu parecer em três dias diferentes, sempre nas mesmas condições de iluminação, desconhecendo a identificação de cada telha, exceto a do padrão (D). A avaliação consistiu na classificação da tonalidade de cada telha com base na paleta cromática representada na figura 3.5.

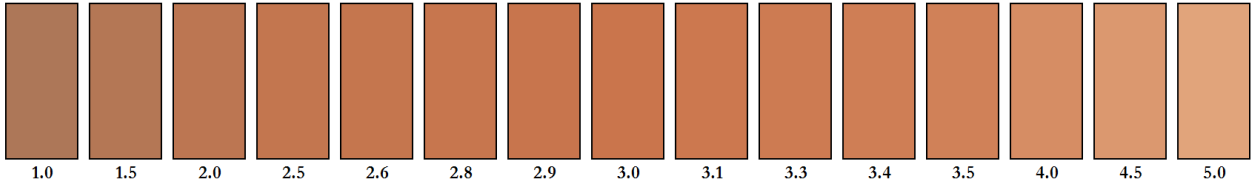


Figura 3.5: Paleta cromática fornecida ao painel avaliador para que pudesse, mais facilmente, classificar as telhas de acordo com uma perspectiva numérica.

Na figura 3.6 estão representadas as distribuições das telhas que foram classificadas pelos avaliadores, nos três dias.



Figura 3.6: Distribuição das telhas nos três dias de avaliação.

Para além de serem classificadas, as telhas foram, ainda, processadas, também nos três dias, e comparadas com o padrão. A classificação determinada pelo painel avaliador foi relacionada com o *match* da telha com o padrão, e foi traçada uma curva que permite relacionar estas duas variáveis.

### 3.2.6 Coerência da cor obtida por simulação

Para determinar o limite de aceitabilidade da cor, foram efetuadas simulações computacionais de variação da cor. A partir de uma fotografia do padrão da telha UM Lusa Vermelha implementaram-se variações aleatórias nas componentes R, G e B, que resultaram numa nova imagem, tendo esta sido classificada como conforme ou não conforme. Para obter um limite de aceitabilidade confiável, foram corridas e classificadas 1000 simulações.



Seguidamente, foram avaliadas as probabilidades de erros do tipo I e II, ficando possível a determinação do limite de aceitabilidade de uma cor, quando comparada com o padrão UM Lusa Vermelho.

### 3.2.7 Avaliação das variações de cor provocadas pelo forno

Foram colocados anéis de temperatura (*Ferro France SARL*, França) em todas as posições de uma vagona, de acordo com o Manual do Sistema de Gestão Integrado da UM (Figura 3.7).



Frente da Vagona

G4	G8	G12	G16
G3	G7	G11	G15
G2	G6	G10	G14
G1	G5	G09	G13
			
Lado Direito			Lado Esquerdo

Orientação: da entrada para saída do forno

Figura 3.7: Mapa de controlo da temperatura no forno da linha 1.

Após a cozedura no forno, os anéis foram recolhidos e identificados, bem como uma telha UM Lusa Vermelha de cada posição. As temperaturas foram obtidas com a medição do diâmetro do anel, através da utilização da folha de conversão que vem com o lote de anéis.

As telhas recolhidas foram fotografadas juntamente com o padrão e foi efetuado o cálculo da sua conformidade. A variação dos valores obtidos foi comparada com a variação da temperatura obtida pelos anéis.

### 3.2.8 Avaliação diária da cor

Foram recolhidas telhas UM Lusa Vermelha durante os meses de fevereiro e abril, em dias aleatórios. As amostras foram retiradas sempre da mesma posição da vagona.

As telhas foram fotografadas juntamente com o padrão e a sua conformidade foi avaliada através do processamento das imagens digitais. As amostras que apresentaram maior discrepância em relação ao padrão foram submetidas ao painel avaliador para classificação, de modo a poderem melhorar o ajuste efetuado na secção 3.2.5.

## Capítulo 4

# Resultados e Discussão

Como referido anteriormente, cerca de 20% das reclamações que chegam à Umbelino Monteiro, S.A. devem-se à falta de conformidade da cor entre produtos. Representando a segunda maior causa de reclamações na empresa, foi necessário começar a estudar novas formas de avaliar a conformidade da cor.

### 4.1 Ensaios preliminares

Foram efetuados ensaios numa sala com iluminação artificial e perto de uma janela. O padrão foi fotografado a par da telha em estudo, de modo a diminuir as interferências provocadas pela variação da iluminação. A figura 4.1 mostra um exemplo de 2 fotografias das mesmas telhas capturadas em diferentes instantes e respetivos *matches* obtidos.

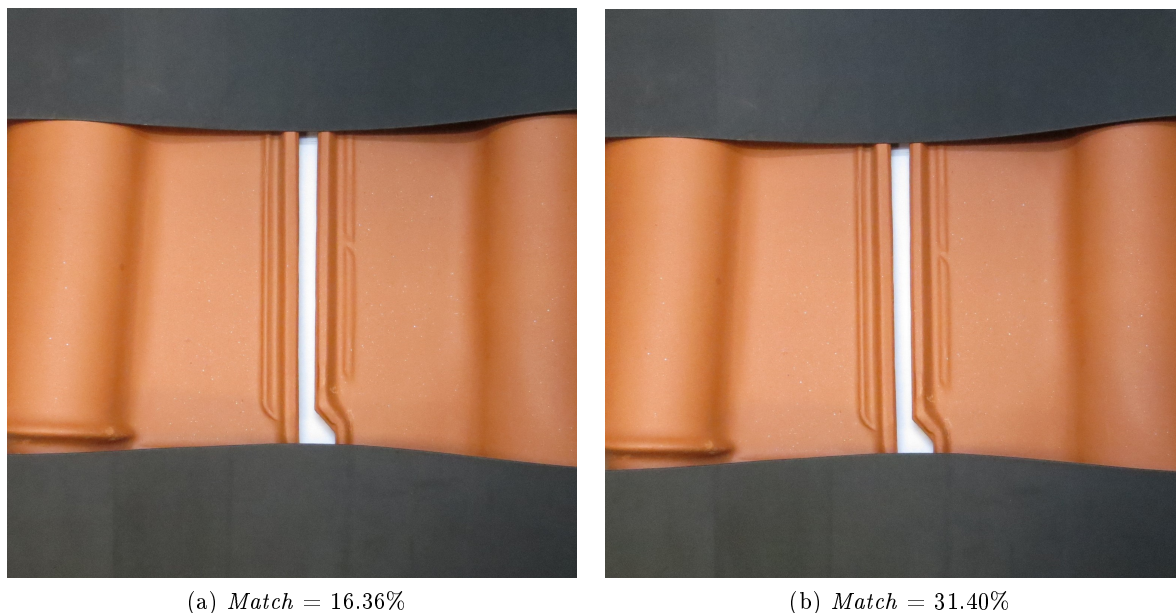


Figura 4.1: Exemplo de resultados obtidos aquando a captura numa sala com interferência da luz exterior. Nestas imagens, a referência cromática encontra-se do lado direito.

Com base nos *matches* obtidos, concluiu-se que as fotografias capturadas na presença de luz natural apresentam grandes discrepâncias entre réplicas, uma vez que o erro padrão percentual

apresenta um valor bastante elevado ( $\%RSE = 31.5\%$ ).

Para além disso, foi avaliada a influência da quantidade de iluminação artificial, nomeadamente na presença de uma, duas e três lâmpadas.

Tabela 4.1: Resultados obtidos aquando a utilização de uma (1), duas (2) e três (3) lâmpadas.

Lâmpadas	Match 1 (%)	Match 2 (%)
<b>1</b>	11.3	16.4
<b>2</b>	11.9	11.1
<b>3</b>	23.0	31.4

Pela análise da tabela anterior, é possível concluir que se obtém um grau de conformidade mais elevado na presença de três lâmpadas (média de 27.2%) e mais baixo na presença de duas lâmpadas (média de 11.5%). No entanto, o coeficiente de variação percentual é bastante mais baixo no caso da captura com duas fontes de luz (4.9%), do que com uma ou três fontes de iluminação (26.0% e 21.8%, respetivamente). Assim, pode-se concluir que a presença de duas lâmpadas torna os resultados mais consistentes entre réplicas. Enquanto que a presença de 1 e 3 lâmpadas aumenta a discrepância dos resultados.

Foram ainda estudados os ângulos de captura da imagem. Neste caso, foi possível concluir que uma fotografia tirada perpendicularmente à amostra apresenta melhores resultados, apresentando uma cor mais uniforme e sem sombras. Por outro lado, uma fotografia tirada com a máquina a um ângulo maior em relação à amostra, resulta numa imagem com maiores interferências, nomeadamente mais sombras e menos homogeneidade na cor.

Adicionalmente, avaliaram-se as imagens captadas a 42.0 cm e a 36.6 cm da amostra. A tabela 4.2 apresenta os resultados do processamento de imagem, em três dias diferentes, de uma telha cuja tonalidade, avaliada a olho nu, é distinta do padrão.

Tabela 4.2: Grau de conformidade ( $Match(\%)$ ) obtido no processamento de uma telha distinta do padrão, aquando a variação da altura da iluminação, bem como a avaliação estatística dos resultados.

	Match (%)	
	42.0 cm	36.6 cm
<b>Dia 1</b>	38.6	61.9
<b>Dia 2</b>	35.5	48.3
<b>Dia 3</b>	37.3	58.2

Pela análise da tabela anterior, é possível concluir que, a uma distância menor (36.6 cm), se obtém valores de conformidade cromática mais elevados (média de 56.1%, quando comparada com a média de 37.1%). No entanto, tal resultado não é demonstrativo de uma avaliação correta, uma vez que o coeficiente de variação percentual também apresentou valores mais elevados (12.5%), quando comparados com a distância maior (4.2%).

Contudo, esta maior dispersão nos valores não está relacionada com nenhum valor anómalo, uma vez que os resultados obtidos pelo teste de Grubbs indicam a não existência de *outliers* ( $G = 1.11 < 1.15 = G_{0.05(3)}$ ).

Antes de avaliar o efeito da distância das lâmpadas à amostra, efetuou-se o teste de Cochran

para verificar a homogeneidade da variância, um dos pressupostos da ANOVA. Apesar da noção de que existe uma grande diferença nos valores da imprecisão relativa, verificou-se que, nesta amostra, as variâncias são estatisticamente equiparáveis ( $C = 0.953 < 0.975 = C_{0.05(2,3)}$ ).

Efetuada-se ANOVA, validada pelo teste de Cochran, verificou-se que existem diferenças na avaliação da conformidade cromática, uma vez que  $TV = 20.88 > 7.71 = F_{0.05(1,4)}^u$  e  $p[H_0] = 0.010$ , ou seja, a hipótese nula, que assumia a ausência de efeito, é rejeitada, o que permite concluir que a distância da lâmpada à amostra é relevante em termos de avaliação da conformidade cromática.

Uma vez que o coeficiente de variação percentual obtido a uma distância superior foi mais baixo, esta distância foi tida em conta como a mais acertada na construção do sistema de iluminação.

Em resumo, uma vez que a iluminação exterior tende a interferir na captura de imagem, optou-se por se desenvolver um sistema isolado, que permita a sua captura paralela às amostras, com duas lâmpadas e ainda com esponja preta não refletora, impedindo a formação de reflexos prejudiciais à imagem. Para além disso, por uma questão de maior coerência de resultados, resolveu-se utilizar referências de cor (preto e branco) de modo a efetuar a correção em todas as imagens adquiridas, de acordo com o anexo B.1.

## 4.2 Avaliação da homogeneidade da iluminação

As imagens foram divididas em 8 secções e sobre cada uma delas foram realizados diversos testes. A figura 4.2 mostra as divisões efetuadas na telha vermelha, captada no primeiro dia.

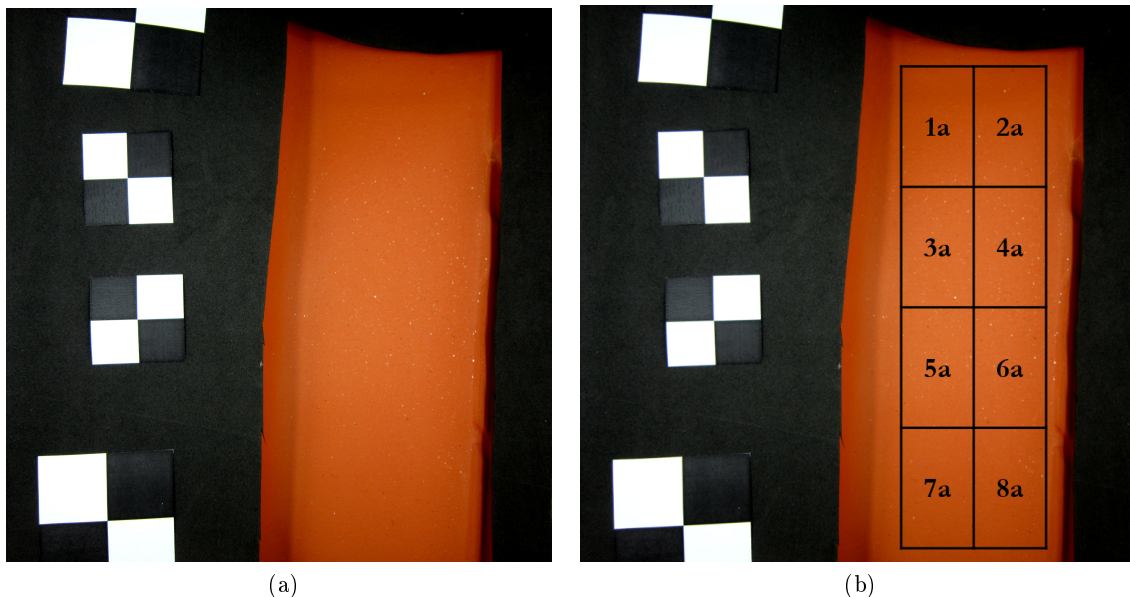


Figura 4.2: Representação esquemática da divisão efetuada na imagem original (a) para avaliação da homogeneidade da iluminação.

Começou-se por efetuar a análise ANOVA de modo a determinar a similaridade das secções formadas. Para tal, foram determinadas as coordenadas RGB (estimativa da mediana dos

histogramas) de cada uma das secções. A tabela 4.3 apresenta os valores obtidos para cada secção.

Tabela 4.3: Estimativas RGB de cada secção da imagem correspondente à telha vermelha, do primeiro dia.

Secção	R	G	B
1a	189	74	7
2a	191	77	11
3a	215	106	42
4a	211	100	37
5a	215	105	41
6a	209	96	33
7a	190	78	14
8a	185	74	11
<b>Média</b>	200.6	88.8	24.5

Como se depreende, cada índice de cor tem uma posição característica em termos de valor, o que resulta em estimativas centrais, obtidas em cada plano de cor, distintas.

No sentido de remover este efeito, foram calculadas novas coordenadas cromáticas, subtraindo os valores médios a cada um dos valores de índice de cor obtidos, tendo-se obtido os valores centrados ( $R_0$ ,  $G_0$  e  $B_0$ ) descritos na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores centrados das coordenadas RGB.

Secção	$R_0$	$G_0$	$B_0$
1a	-11.6	-14.8	-17.5
2a	-9.6	-11.8	-13.5
3a	14.4	17.2	17.5
4a	10.4	11.2	12.5
5a	14.4	16.2	16.5
6a	8.4	7.2	8.5
7a	-10.6	-10.8	-10.5
8a	-15.6	-14.8	-13.5
<b>Média</b>	0.0	0.0	0.0

Efetuando a análise ANOVA sobre os índices de cor centrados, verifica-se que estes não são concordantes, uma vez que o valor de teste é superior ao valor crítico ( $TV = 242.81 > 2.66 = F_{0.05(7,16)}^u$ ) e o valor de prova é nulo. Nesta situação, a secção mais discrepante da globalidade é a secção 3a.

Removendo esta secção do conjunto inicial de 8 objetos, continua-se a detetar falta de conformidade nos índices de cor ( $TV = 226.95 > 2.85 = F_{0.05(6,14)}^u$ ;  $p[H_0] = 0.000$ ). Agora, a secção mais discrepante da globalidade passou a ser a secção 5a.

Prosseguindo este estudo de eliminação de valores menos conformes, encontram-se ainda as secções 4a e 6a como secções distintas.

As secções 1a, 2a, 7a e 8a são consideradas similares uma vez que o valor de prova é superior a 0.05 ( $p[H_0] = 0.061$ ), valor mínimo imposto para aceitação da hipótese nula. Para além disso, o valor de teste é inferior ao valor crítico ( $TV = 3.72 < 4.07 = F_{0.05(3,8)}^u$ ).

A figura 4.3 mostra o modo como a estimativa puramente aleatória varia, à medida que os objetos discrepantes são removidos.

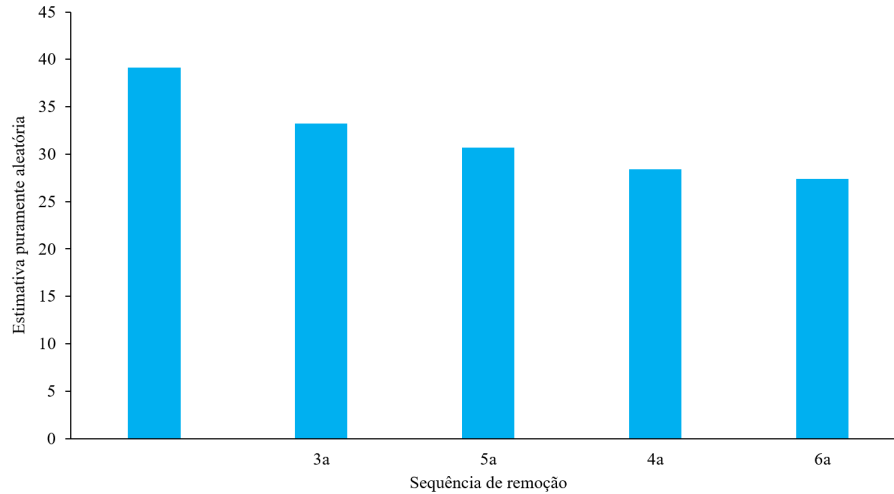


Figura 4.3: Representação gráfica da variação da estimativa puramente aleatória em função da sequência de remoção das secções distintas (3a, 5a, 4a e 6a). A última coluna representa, assim, a estimativa puramente aleatória correspondente ao grupo coerente.

Da figura anterior verifica-se que a estimativa puramente aleatória vai diminuindo à medida que são removidos os valores discrepantes (3a-6a). No caso de se estar a efetuar ANOVA sem réplicas, esta diminuição sistemática revela o efeito da contribuição do desvio sistemático na estimativa da dispersão, de um modo similar ao efeito dos valores discrepantes sobre a dispersão da estimativa central (média populacional).

Esta avaliação da conformidade da cor, através da análise ANOVA das estimativas de índice de cor, indica que apenas as secções 1a, 2a, 7a e 8a são consideradas estatisticamente iguais.

Contudo, por inspeção visual humana tem-se a noção de que o material fotografado é relativamente uniforme, isto é, não são detetadas faltas de uniformidade de cor ou de textura. Assim sendo, a falta de conformidade deve ser atribuída a discrepâncias na iluminação, ou seja, a uma falta de homogeneidade da iluminação na região onde for realizada a amostragem de cor.

Por outro lado, com esta análise, não foi possível determinar a similaridade entre as secções centrais (3a, 4a, 5a e 6a), uma vez que estas foram descartadas ao longo do teste.

No sentido de perceber melhor as similaridades entre as oito secções, foi efetuado um estudo de análise hierárquica de agrupamentos. Na figura 4.4 encontra-se o dendrograma da associação das secções em estudo, através do método de ligação simples (*single linkage*), desenvolvido em R-Project.

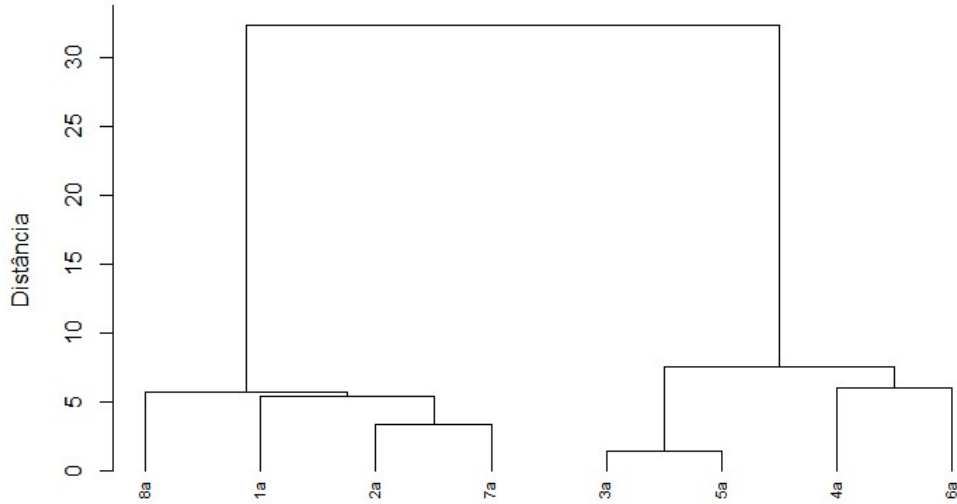


Figura 4.4: Dendrograma de classificação das secções da imagem atendendo à sua proximidade cromática.

De acordo com este dendrograma, verifica-se que as secções mais similares são a 3a e a 5a que se situam na região central da imagem.

O dendrograma evidencia, também, uma particularidade muito interessante: a presença de dois ramos muito divergentes. O ramo da esquerda corresponde às secções mais escuras e extremas da imagem, enquanto que o ramo da direita corresponde às secções centrais e melhor iluminadas.

Com base nesta verificação, e tendo em conta que dentro da região melhor iluminada se encontram as secções mais similares, é possível concluir que a região central (3a a 6a) é a que possui melhores características em termos de iluminação.

Na tabela 4.5 encontra-se evidenciada a divisão das secções nas diferentes regiões e a respetiva estimativa central.

Tabela 4.5: Divisão das secções e respetiva média dos índices de cor obtidos.

Secção	Menor iluminação			Maior iluminação		
	R	G	B	R	G	B
1a	189	74	7			
2a	191	77	11			
3a				215	106	42
4a				211	100	37
5a				215	105	41
6a				209	96	33
7a	190	78	14			
8a	185	74	11			
<b>Média</b>	188.8	75.8	10.8	212.5	101.8	38.2

No sentido de avaliar a homogeneidade dos índices de cor na região central, efetuou-se de novo a análise ANOVA, com as estimativas centradas.

Na presença das 4 secções, esta região central é considerada heterogénea, uma vez que o valor de teste é superior ao valor crítico ( $TV = 75.95 > 4.07 = F_{0.05(3,8)}^u$ ) e  $p[H_0] = 0.000$ . A secção 6a

apresentou-se como a mais discrepante, tendo sido removida do grupo. Após a sua remoção, a heterogeneidade mantém-se, devido à secção 4a ( $TV = 64.98 > 5.14 = F_{0.05(2,6)}^u$ ;  $p[H_0] = 0.000$ ).

Com apenas as secções 3a e 5a em avaliação, a região torna-se homogênea, resultado já previsto pelo dendrograma, uma vez que estas regiões eram as mais similares de entre todas as outras.

Os mesmos resultados foram obtidos com a análise de uma telha de cor diferente.

Estes resultados permitem concluir que é possível fazer uso das estimativas dos índices de cor para comparar as características cromáticas entre secções de uma mesma imagem digital. O estudo das imagens nas condições de iluminação e aquisição selecionadas permitiu evidenciar a heterogeneidade da iluminação e eleger, apesar de algumas discrepâncias, a região central como a que melhor poderá ser utilizada como representativa na caracterização da cor.

Para além da utilização das análises ANOVA e hierárquica de agrupamentos para avaliar a homogeneidade da iluminação, foram também calculados os graus de conformidade da cor (*match*) entre as diferentes secções, através do algoritmo descrito no Anexo B.2.

Os resultados da comparação das secções da telha vermelha, no primeiro dia de amostragem, estão descritos na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Coerência cromática global (%) obtida entre as diferentes secções da telha vermelha, no primeiro dia.

	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a
1a	90.6	10.8	20.6	12.9	29.5	79.4	81.3
2a		12.9	24.4	15.6	34.2	82.1	78.6
3a			68.5	90.6	56.2	9.5	6.4
4a				77.2	82.8	21.6	14.3
5a					65.0	12.1	7.5
6a						33.1	22.5
7a							85.0

Ao analisar os valores obtidos pode-se concluir que as regiões extremas (1a, 2a, 7a e 8a), destacadas a azul, e central (3a, 4a, 5a, e 6a), evidenciada a vermelho, são díspares, no entanto, dentro da mesma região, as probabilidades de correspondência são semelhantes.

Para melhor avaliar esta situação, foram traçados os histogramas de cor de cada secção (Figura 4.5).



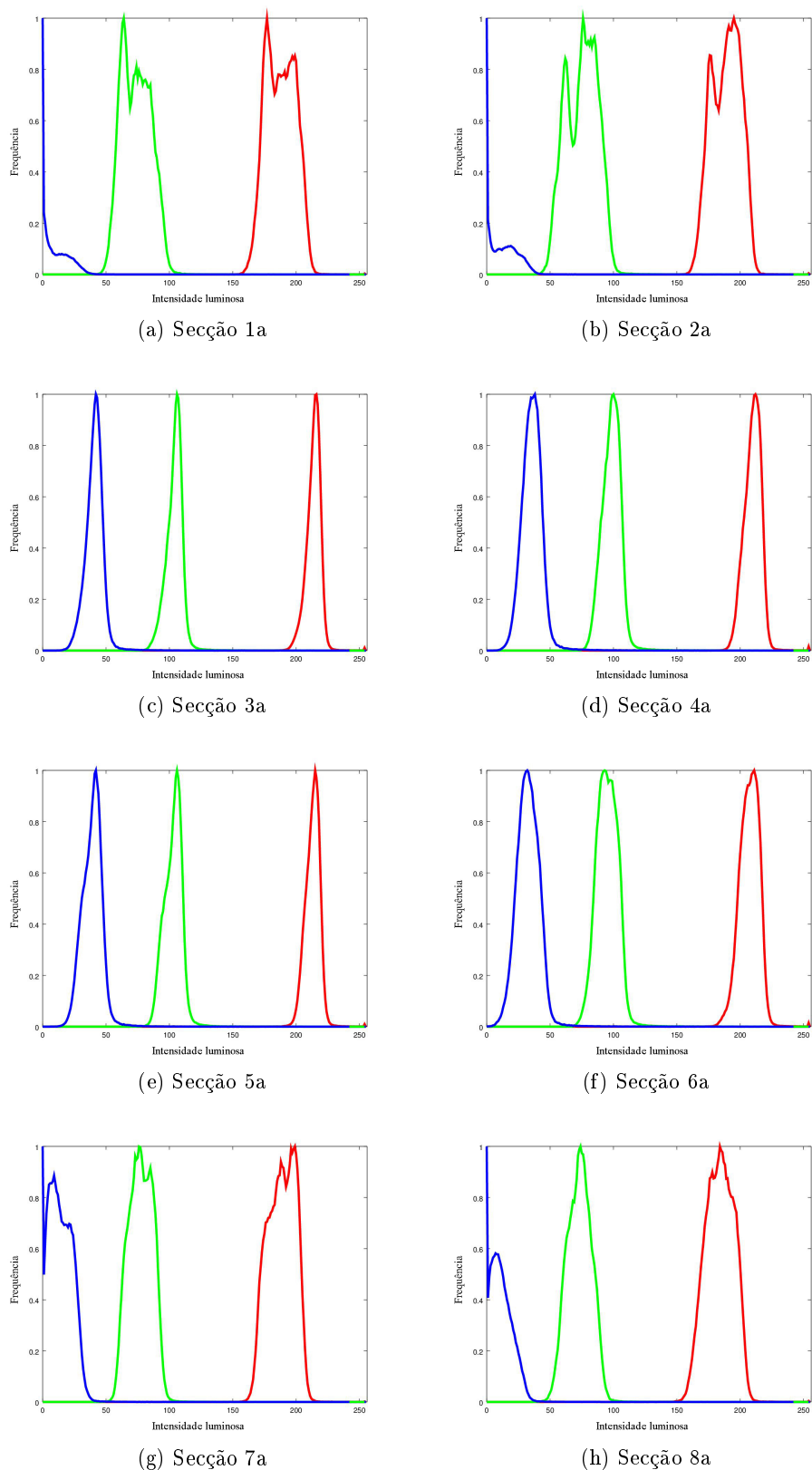


Figura 4.5: Histogramas cromáticos de cada uma das secções da telha vermelha, no dia 1.

Na figura anterior observa-se que, realmente, as regiões apresentam comportamentos diferentes: a região central apresenta uma definição melhor e com picos mais afilados, enquanto que

as secções mais extremas apresentam interferências, uma vez que os histogramas são irregulares. Deste modo, conclui-se que a região central trata-se da região onde a iluminação é mais uniforme, não apresentando sombras que escurecem a imagem.

A mesma análise foi efetuada na telha branca, tendo sido tiradas as mesmas conclusões.

Para averiguar a existência de grandes variações nos resultados de fotografias tiradas em dias diferentes, foi também fotografada a telha vermelha em dois dias diferentes. As imagens foram processadas e as secções equivalentes entre si foram comparadas, estando os resultados descritos na tabela.

Tabela 4.7: Coerência cromática global (%) obtida entre as diferentes secções equivalentes nos dois dias de captura.

	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a
1b	84.3							
2b		79.6						
3b			70.5					
4b				71.1				
5b					80.8			
6b						87.1		
7b							92.7	
8b								92.3

Como se pode observar, os índices de conformidade cromática (*match*(%)) são bastante elevados, pelo que é sugerido que não existem grandes variações aquando a captura em dias diferentes.

Deste modo, conclui-se que a iluminação do sistema de luz não é uniforme e a parte utilizada na amostragem deverá ser a central, sendo esta região a utilizada ao longo do decorrer do projeto. Por outro lado, o sistema de iluminação é quase insensível à alteração dos dias, podendo as fotografias serem capturadas a qualquer hora e dia.

### 4.3 Caracterização cromática das telhas

As coordenadas cromáticas de cada uma das telhas das gamas UM Lusa e Advance Premium Lusa foram determinadas recorrendo ao algoritmo descrito no anexo B.3.

Nas imagens capturadas foram seleccionadas secções sem sombras nem brilhos, que afetam a correta caracterização da cor. A imagem 4.6 mostra as zonas de amostragem de cada uma das telhas em estudo.



Figura 4.6: Zona de amostragem das telhas UM Lusa e Advance Lusa.

Inicialmente, foram traçados os histogramas da cor de cada uma das telhas estudadas (Figura 4.7).

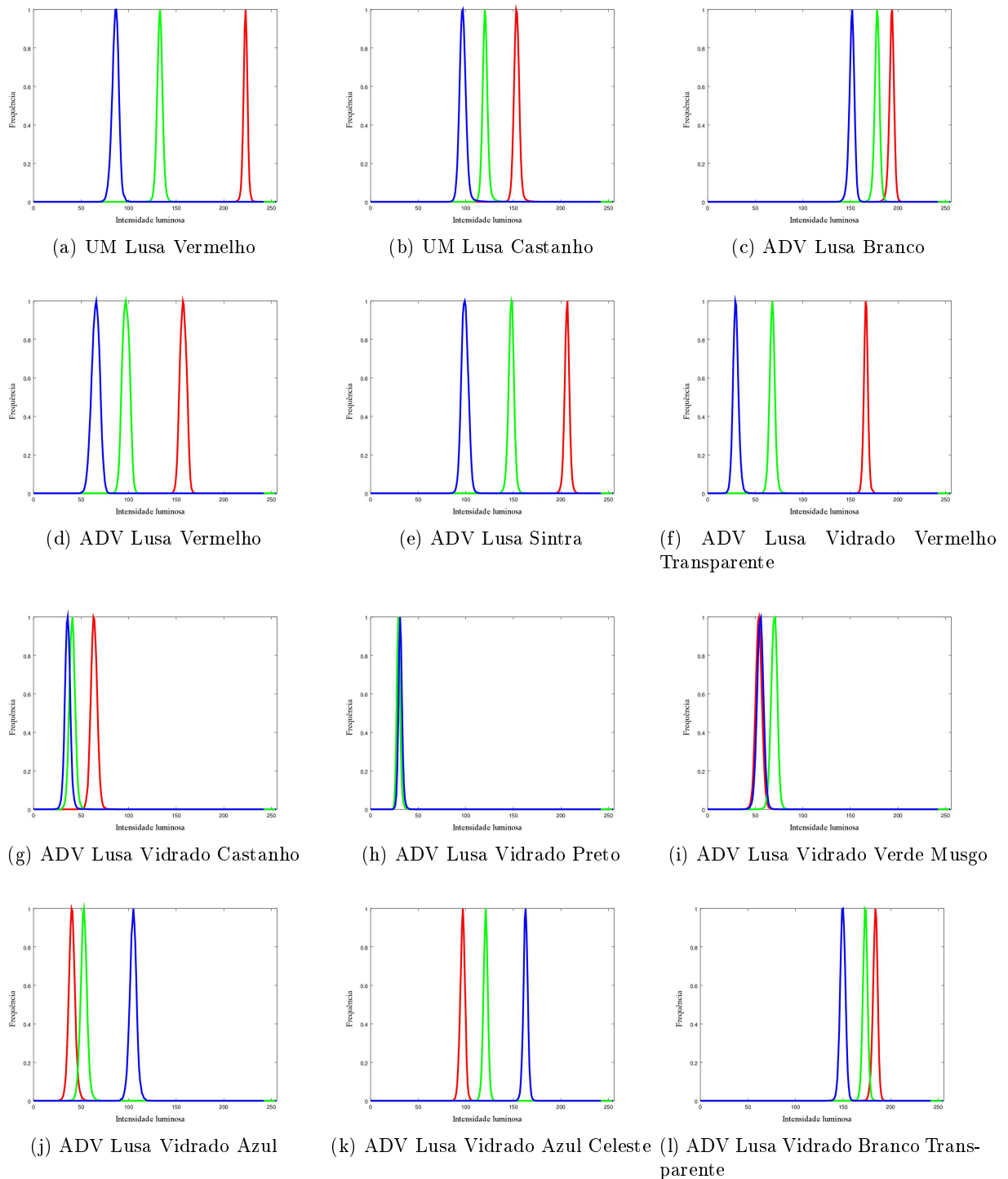


Figura 4.7: Histogramas das cores das telhas UM Lusa e Advance Lusa.

A partir da análise dos histogramas da figura 4.7 é possível observar que todas as cores são homogêneas, sem brilhos nem sombras, uma vez que as distribuições dos índices de cor apresentam um perfil afilado e bem definido, característico de uma boa uniformidade cromática. Adicionalmente, é possível aferir a cor de uma dada imagem. Por exemplo, as telhas mais

avermelhadas (Figuras 4.7a, 4.7d e 4.7f) apresentam o índice de cor R mais elevado que os índices G e B, isto é, a cor vermelha está mais presente nestas imagens que as restantes cores primárias, daí as telhas apresentarem essa tonalidade. Por outro lado, a telha preta (Figura 4.7h) apresenta valores cromáticos bastante baixos e nas mesmas proporções, resultando numa grande ausência de cor, determinando a sua aparência escura. À semelhança das telhas vermelhas, as telhas azuis (Figuras 4.7j e 4.7k) e verde (Figura 4.7i) apresentam como índices mais elevados as componentes azul e verde, respetivamente.

Como referido na secção 3.2.3, quando as condições cromáticas de uma imagem não são uniformes, é natural que surjam alterações no perfil da distribuição dos índices de cor. No sentido de obter uma estimativa mais robusta e fiável em relação à predominância do índice cromático, optou-se por estimar estes valores através da mediana da respetiva distribuição (coordenadas RGB).

Na tabela 4.8 estão descritos os resultados obtidos para cada um dos modelos de telhas.

Tabela 4.8: Caracterização cromática de algumas telhas produzidas na Umbelino Monteiro, S.A.

	Modelo	(R,G,B)
<b>UM Lusa</b>	Vermelho	(224,134,87)
	Castanho	(155,121,98)
<b>ADVANCE Premium Lusa</b>	Vermelho	(158,98,66)
	Sintra	(208,149,100)
	Branco	(195,179,153)
	V. Vermelho Transparente	(167,69,30)
	V. Castanho	(65,42,37)
	V. Preto	(30,30,32)
	V. Verde Musgo	(55,71,56)
	V. Azul	(41,54,106)
	V. Azul Celeste	(98,122,164)
	V. Branco Transparente	(185,174,151)

Para facilitar a visualização destas cores, estas podem ser representadas sob a forma de gráfico tridimensional, semelhante à representação do modelo cromático RGB (Secção 2.5.1). A figura 4.8 mostra essa representação espacial das cores das telhas, efetuada em R-Project.

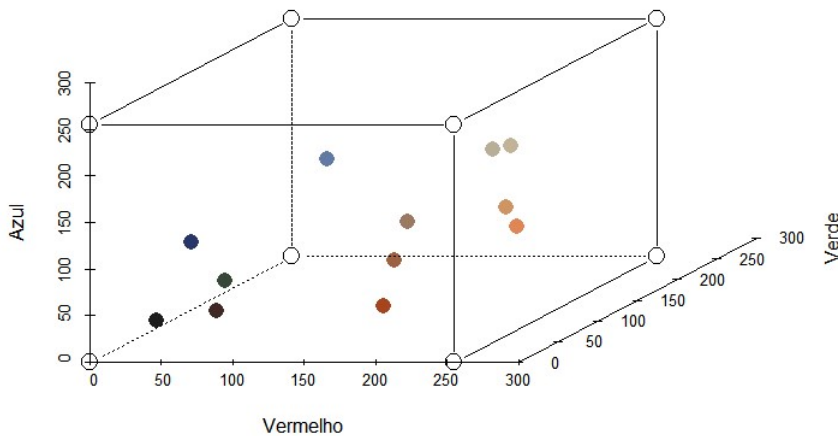


Figura 4.8: Representação gráfica tridimensional das cores das telhas caracterizadas.

#### 4.4 Determinação da cor RAL das telhas

Para a conversão das cores das telhas em cores RAL, foi utilizada uma paleta de RAL Clássico. No sentido de minimizar os erros na comparação das imagens, a paleta foi fotografada em simultâneo com a respetiva telha, junto à área de iluminação mais uniforme (Figura 4.9).



Figura 4.9: Exemplo de uma fotografia obtida para o estudo das cores RAL.

Para atribuir uma cor RAL a cada uma das telhas, foi utilizado o algoritmo de cálculo do *match* (B.2) sobre todas as cores da paleta que, por inspeção visual, pudessem ser semelhantes à cor da telha. Os resultados encontram-se descritos na tabela 4.9.

Tabela 4.9: Grau de conformidade (*Match*(%)) das cores RAL em relação às cores das telhas em estudo.

Telha	RAL	<i>Match</i> (%)	Telha	RAL	<i>Match</i> (%)
UM Lusa Vermelho	2000	0.0	UM Lusa Castanho	8002	0.0
	2011	0.0		8003	0.0
	<b>2012</b>	<b>4.3</b>		8024	23.8
	8023	0.0		<b>8025</b>	<b>54.3</b>
ADV Lusa Vermelho	2000	0.0	ADV Lusa V. Azul	5003	1.1
	2001	0.0		5004	2.8
	<b>8003</b>	<b>1.3</b>		5011	27.7
	8004	0.0		<b>5013</b>	<b>74.1</b>
	8023	0.3		5022	13.9
ADV Lusa Sintra	1017	0.0	ADV Lusa V. Castanho	8016	0.1
	1034	0.0		<b>8017</b>	<b>0.6</b>
	1037	0.0		8028	0.0
ADV Lusa Branco	<b>1001</b>	<b>6.2</b>	ADV Lusa V. Vermelho Transparente	2001	0.0
	1013	0.0		2002	0.0
	1014	1.6		<b>8004</b>	<b>0.4</b>
	1015	0.0		8023	0.0
ADV Lusa V. Preto	9010	0.0	ADV Lusa V. Branco Transparente	1001	1.8
	<b>9017</b>	<b>64.0</b>		1013	0.0
				<b>1014</b>	<b>14.3</b>
				1015	0.6
ADV Lusa V. Verde Musgo	<b>6007</b>	<b>59.9</b>	ADV Lusa V. Azul Celeste	5007	6.6
	6009	3.5		5014	0.7
	6020	0.0		<b>5023</b>	<b>31.6</b>

Pela análise dos resultados é possível concluir que as telhas que possuem cores naturais, isto é, sem qualquer tipo de aditivos, vidros ou corantes, são dificilmente caracterizadas em termos de cor RAL, uma vez que a sua cor não provém de uma tinta. Ainda assim, embora com uma percentagem bastante baixa, é possível obter uma cor RAL aproximada. Para as restantes cores de telhas, é perceptível a cor RAL correspondente, podendo até ser possível comparar as suas coordenadas obtidas na literatura [28] pelas coordenadas resultantes da caracterização cromática (Secção 4.3) (Tabela 4.10).

Tabela 4.10: Comparação entre as coordenadas RGB das cores RAL e as obtidas na caracterização cromática.

<b>Telha</b>	<b>RAL</b>	<b>Designação</b>	<b>RGB (RAL)</b>	<b>RGB (Telha)</b>	<b>Match(%)</b>
<b>UM Lusa Vermelho</b>	2012	Salmão	(235,106,14)	(224,134,87)	4.3
<b>UM Lusa Castanho</b>	8025	Castanho claro	(117,92,72)	(155,121,98)	54.3
<b>ADV Lusa Vermelho</b>	8003	Castanho argila	(115,66,34)	(158,98,66)	1.3
<b>ADV Lusa Branco</b>	1001	Bege	(217,186,140)	(195,179,153)	6.2
<b>ADV Lusa V. Vermelho T.</b>	8004	Castanho cobre	(142,64,42)	(167,69,30)	0.4
<b>ADV Lusa V. Castanho</b>	8017	Castanho chocolate	(69,50,46)	(65,42,37)	0.6
<b>ADV Lusa V. Preto</b>	9017	Preto tráfico	(30,30,30)	(30,30,32)	64.0
<b>ADV Lusa V. Verde Musgo</b>	6007	Verde garrafa	(52,59,41)	(55,71,56)	59.9
<b>ADV Lusa V. Azul</b>	5013	Azul cobalto	(37,41,74)	(41,54,106)	74.1
<b>ADV Lusa V. Azul Celeste</b>	5023	Azul distante	(73,103,141)	(98,122,164)	31.6
<b>ADV Lusa V. Branco T.</b>	1014	Marfim	(225,204,79)	(185,174,151)	14.3

Pelos dados da tabela acima é possível observar que as cores das telhas que mais se afastam das cores RAL são as que apresentam um grau de conformidade mais baixo. Apesar de serem apenas aproximações, este estudo facilita a determinação da cor RAL de uma telha que, por vezes, é duvidosa quando feita através de comparações humanas.

## 4.5 Visão humana vs. processamento digital de imagens

Com o auxílio da paleta cromática, que estabelecia índices cromáticos situados entre 1.0 e 5.0, sendo o valor 3.0 correspondente à cor do padrão em avaliação, o painel avaliador classificou cada uma das telhas desconhecidas em 3 dias distintos. Essa classificação encontra-se detalhada na tabela 4.11.

Tabela 4.11: Classificação das telhas (A-H) por um painel avaliador (Av.1-Av.5), em três dias distintos (Dia 1 a Dia 3).

		Av. 1	Av. 2	Av. 3	Av. 4	Av. 5
<b>A</b>	<i>Dia 1</i>	2.9	2.8	2.6	2.5	3.0
	<i>Dia 2</i>	2.9	2.8	2.5	2.8	3.0
	<i>Dia 3</i>	3.1	3.0	3.3	2.6	2.9
<b>B</b>	<i>Dia 1</i>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	<i>Dia 2</i>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	<i>Dia 3</i>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>C</b>	<i>Dia 1</i>	2.8	3.0	3.3	3.1	3.0
	<i>Dia 2</i>	3.0	3.1	2.8	3.0	3.3
	<i>Dia 3</i>	2.9	3.1	3.0	3.1	2.9
<b>E</b>	<i>Dia 1</i>	2.8	3.0	2.6	2.9	2.8
	<i>Dia 2</i>	3.0	2.9	3.0	3.0	3.0
	<i>Dia 3</i>	2.9	3.1	2.6	3.0	2.6
<b>F</b>	<i>Dia 1</i>	3.0	3.1	2.9	3.0	3.0
	<i>Dia 2</i>	3.1	3.0	2.6	2.9	3.2
	<i>Dia 3</i>	3.0	3.1	3.0	3.2	2.6
<b>G</b>	<i>Dia 1</i>	2.9	2.9	2.8	2.6	3.0
	<i>Dia 2</i>	2.6	2.9	2.6	2.7	3.0
	<i>Dia 3</i>	3.1	3.0	3.3	2.5	3.0
<b>H</b>	<i>Dia 1</i>	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	<i>Dia 2</i>	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	<i>Dia 3</i>	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

Através dos testes de Cochran e ANOVA foi possível analisar a concordância do painel avaliador.

Olhando exclusivamente para os resultados obtidos com a amostra A, o teste de Cochran revela que existe um valor excessivo de variância associada ao avaliador 3 (Av. 3), uma vez que  $TV = 0.78$ , superior ao valor crítico previsto por Cochran ( $C_{0.05(5,3)} = 0.68$ ).

Sem remover os resultados do avaliador 3, o teste ANOVA conduz a um valor de teste inferior ao valor crítico ( $TV = 1.18 < 3.48 = F_{0.05(4,10)}^u$ ), o que revela que o painel avaliador concorda na sua avaliação no que se refere à amostra A ( $p[H_0] = 0.375$ ).

Reprocessando a análise, após serem removidos os resultados do avaliador 3, verifica-se que as variâncias no critério de avaliação dos avaliadores restantes são conformes. Contudo, devido à redução drástica da estimativa da variabilidade puramente aleatória, agora passa a haver diferenças entre os avaliadores.

Passando à amostra B, a concordância nos critérios de avaliação é absoluta, uma vez que todos os avaliadores reportaram o valor “1.0”, sendo a variabilidade nula.



No que se refere à amostra C, todos os analistas apresentaram uma variabilidade concordante ( $TV = 0.51 < 0.68 = C_{0.05(5,3)}$ ) e também uma concordância em relação à posição ( $p[H_0] = 0.649 \gg 0.050$ ).

Quanto às amostras E, F e G, as conclusões são também de concordância na dispersão e na posição.

À semelhança da amostra B, a amostra H foi também avaliada em absoluta concordância.

Uma vez que o avaliador 3 foi o único a apresentar desvios, e em apenas uma única telha, esta foi submetida novamente a avaliação, tendo a nova classificação revelado homogeneidade da variância. Tal facto mostra que a inspeção visual da cor está realmente sujeita a erros e nem sempre a avaliação de uma pessoa é a mais correta.

Uma vez que, em todos os casos, existe concordância nas classificações, é possível calcular uma estimativa global da classificação para cada uma das réplicas das telhas (Tabela 4.12).

Tabela 4.12: Estimativa global da classificação das telhas (Média), nos três dias de avaliação.

		<b>Média</b>
<b>A</b>	<i>Dia 1</i>	2.76
	<i>Dia 2</i>	2.80
	<i>Dia 3</i>	2.98
<b>B</b>	<i>Dia 1</i>	1.00
	<i>Dia 2</i>	1.00
	<i>Dia 3</i>	1.00
<b>C</b>	<i>Dia 1</i>	3.04
	<i>Dia 2</i>	3.04
	<i>Dia 3</i>	3.00
<b>E</b>	<i>Dia 1</i>	2.82
	<i>Dia 2</i>	2.98
	<i>Dia 3</i>	2.84
<b>F</b>	<i>Dia 1</i>	3.00
	<i>Dia 2</i>	2.96
	<i>Dia 3</i>	2.98
<b>G</b>	<i>Dia 1</i>	2.84
	<i>Dia 2</i>	2.76
	<i>Dia 3</i>	2.98
<b>H</b>	<i>Dia 1</i>	5.00
	<i>Dia 2</i>	5.00
	<i>Dia 3</i>	5.00

Após a análise da concordância dos avaliadores, pretende-se relacionar estes valores, obtidos por inspeção visual, com os obtidos computacionalmente, através do processamento de imagem. Para tal, foram fotografadas as mesmas telhas, em triplicado, nos mesmos dias de classificação. Na figura 4.10 encontram-se algumas imagens captadas no primeiro dia de classificação.

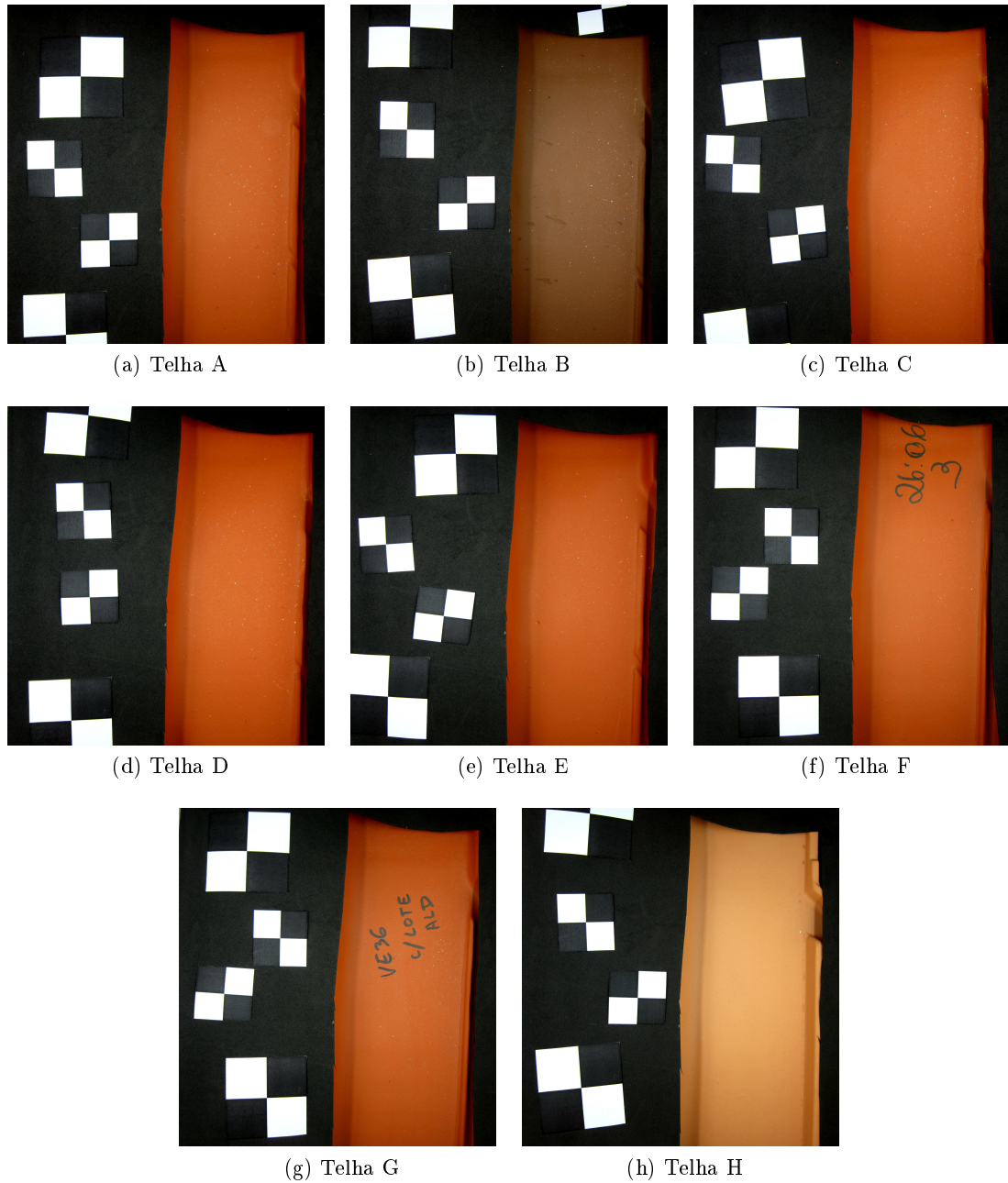


Figura 4.10: Imagens das telhas capturadas no primeiro dia de avaliação.

Estas imagens foram processadas e determinaram-se as estimativas dos índices de cor (Tabela 4.13).

Tabela 4.13: Estimativas robustas dos índices de cor (R, G, B) e respectivos valores centrados na média global ( $R_0, G_0, B_0$ ).

	<b>R</b>	<b>G</b>	<b>B</b>	<b>R<sub>0</sub></b>	<b>G<sub>0</sub></b>	<b>B<sub>0</sub></b>
<b>A1</b>	202	100	41	-12.8	-18.3	-14.7
<b>A2</b>	201	98	40	-13.8	-20.3	-15.7
<b>A3</b>	202	101	42	-12.8	-17.3	-13.7
<b>B1</b>	137	93	57	-77.8	-25.3	1.3
<b>B2</b>	138	93	58	-76.8	-25.3	2.3
<b>B3</b>	137	92	55	-77.8	-26.3	-0.7
<b>C1</b>	211	106	45	-3.8	-12.3	-10.7
<b>C2</b>	209	103	42	-5.8	-15.3	-13.7
<b>C3</b>	210	106	44	-4.8	-12.3	-11.7
<b>D1</b>	214	104	41	-0.8	-14.3	-14.7
<b>D2</b>	217	106	41	2.2	-12.3	-14.7
<b>D3</b>	215	104	38	0.2	-14.3	-17.7
<b>E1</b>	205	99	39	-9.8	-19.3	-16.7
<b>E2</b>	205	100	41	-9.8	-18.3	-14.7
<b>E3</b>	208	102	41	-6.8	-16.3	-14.7
<b>F1</b>	210	108	47	-4.8	-10.3	-8.7
<b>F2</b>	209	104	44	-5.8	-14.3	-11.7
<b>F3</b>	212	108	48	-2.8	-10.3	-7.7
<b>G1</b>	205	103	45	-9.8	-15.3	-10.7
<b>G2</b>	204	105	46	-10.8	-13.3	-9.7
<b>G3</b>	205	107	48	-9.8	-11.3	-7.7
<b>H1</b>	236	174	104	21.2	55.7	48.3
<b>H2</b>	238	176	108	23.2	57.7	52.3
<b>H3</b>	239	174	104	24.2	55.7	48.3
<b>Média</b>	214.8	118.3	55.7	0.0	0.0	0.0

Antes de entrar numa abordagem mais estatística, efetuou-se a análise de similaridade por avaliação hierárquica de agrupamentos, tendo como critério a maior similaridade (ligação simples). O dendrograma obtido encontra-se na figura 4.11.

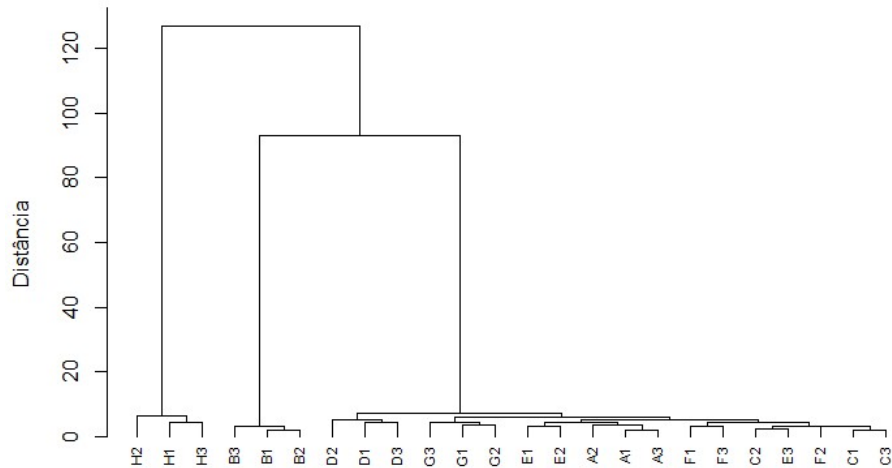


Figura 4.11: Dendrograma das telhas em estudo.

Do dendrograma obtido observa-se que as amostras B e H são as mais discrepantes em termos de conformidade de cor.

Verifica-se também que, regra geral, as réplicas estão intimamente associadas (boa proximidade de valores), o que nos leva a assumir que existe uma boa correspondência de índices cromáticos entre imagens do mesmo objeto, fotografadas nas mesmas condições, conferindo mais fiabilidade a este estudo.

Para além disso, é possível concluir que todas as telhas em estudo (à exceção das B e H) são semelhantes ao padrão (D).

Efetuando a análise ANOVA com este grupo mais homogéneo, verifica-se que, por comparação direta dos valores centrados, existe coerência cromática ( $TV = 0.96 < 1.92 = F_{0.05(17,36)}^u; p[H_0] = 0.520$ ).

Apesar de ser possível comparar cores através da avaliação dos índices cromáticos, este processo não é tão eficiente na distinção de tons semelhantes como o painel avaliador. Para tal, é necessário ter em conta todo o histograma de uma imagem digital e efetuar o cálculo do grau de conformidade da cor (*match*), de acordo com o definido na secção 2.9 e no anexo B.2. A partir desta etapa apenas será tido em conta o cálculo do *match* cromático.

Assim, após a determinação do *match* de cada uma das telhas com o padrão, foi verificada a existência de *outliers* nas réplicas de cada telha, em cada um dos dias, através do teste de Grubbs. Este teste não mostrou a presença de valores discrepantes em nenhum caso, pelo que foi possível obter as estimativas de *match* das telhas em cada um dos dias. Esses valores estão descritos na tabela 4.14.

Tabela 4.14: Classificação e estimativa da conformidade de cor ( $match(\%)$ ) das sete telhas em estudo, nos três dias diferentes.

		Class.	Match (%)
<b>A</b>	<i>Dia 1</i>	2.76	48.3
	<i>Dia 2</i>	2.80	58.2
	<i>Dia 3</i>	2.98	61.9
<b>B</b>	<i>Dia 1</i>	1.00	7.9
	<i>Dia 2</i>	1.00	8.1
	<i>Dia 3</i>	1.00	6.7
<b>C</b>	<i>Dia 1</i>	3.04	68.9
	<i>Dia 2</i>	3.04	75.6
	<i>Dia 3</i>	3.00	83.2
<b>E</b>	<i>Dia 1</i>	2.82	65.3
	<i>Dia 2</i>	2.98	74.3
	<i>Dia 3</i>	2.84	70.2
<b>F</b>	<i>Dia 1</i>	3.00	71.3
	<i>Dia 2</i>	2.96	80.4
	<i>Dia 3</i>	2.98	87.3
<b>G</b>	<i>Dia 1</i>	2.84	59.5
	<i>Dia 2</i>	2.76	64.3
	<i>Dia 3</i>	2.98	63.3
<b>H</b>	<i>Dia 1</i>	5.00	0.5
	<i>Dia 2</i>	5.00	1.7
	<i>Dia 3</i>	5.00	0.7

Com base nos resultados representados acima, foi possível traçar um gráfico do grau de conformidade global da cor de uma telha com o respectivo padrão, em função da sua classificação numérica baseada na paleta cromática.

Adicionalmente, foram tidas em conta as classificações de duas telhas retiradas para análise diária (Secção 4.8) com o menor valor de correspondência, de modo a melhorar o ajuste.

Assumindo que o painel avaliador classificou as telhas com base na paleta cromática desenvolvida para o efeito (Figura 3.5), esperam-se obter maiores taxas de conformidade cromática ( $match$ ) próximas do valor correto do padrão (3.00) e menores valores de  $match$  longe desse valor de referência.

Assim, como primeira abordagem, era esperado obter uma função do tipo gaussiana, centrada no valor de referência, de forma a exprimir a taxa de conformidade cromática ( $f(x)$ ) em função da classificação obtida pelo painel de avaliação ( $x$ ), de acordo com a equação 4.1,

$$f(x) = b_0 + b_1 \times e^{-b_2(x-b_3)^2} \quad (4.1)$$

onde  $b_0$  representa a linha de base,  $b_1$  está relacionado com o máximo da curva,  $b_2$  relaciona-se com sua largura e  $b_3$  corresponde ao valor de  $x$  cuja ordenada toma o valor máximo e que, neste caso é 3, correspondente ao padrão.

O gráfico resultante do ajuste efetuado, desenvolvido em R, encontra-se representado na figura 4.12.

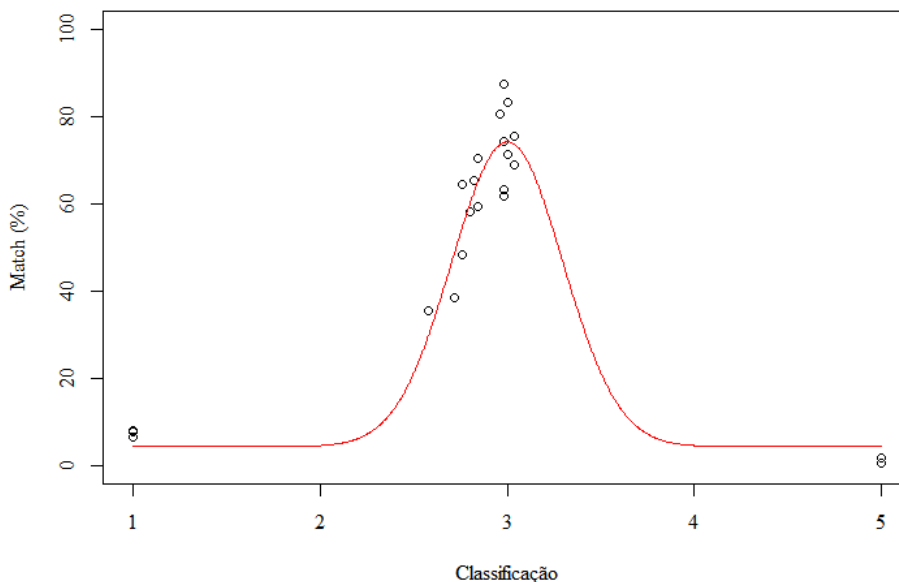


Figura 4.12: Representação gráfica do ajuste gaussiano efetuado aos valores determinados pelo painel de avaliação e pelo processamento digital de imagens.

Como seria de esperar, o gráfico apresenta a forma de uma curva gaussiana, em que o valor máximo está centrado no valor do padrão e, à medida que a cor da telha se afasta do mesmo, o *match* diminui.

Através da linguagem R foi ainda possível avaliar o significado estatístico dos parâmetros do ajuste, cujos resultados se encontram na tabela 4.15.

Tabela 4.15: Parâmetros estimados no ajuste da função gaussiana efetuado em R-Project.

	Estimativa	Desvio Padrão	TV	$p[H_0]$
$b_0$	4.4	2.8	1.5	0.143
$b_1$	69.7	3.6	19.2	0.000
$b_2$	5.7	1.1	5.2	0.000

Para avaliar o significado estatístico dos parâmetros de um ajuste, recorre-se ao teste de *t-Student*. Neste teste, a hipótese nula assume que o parâmetro a testar não tem significado estatístico, isto é, é igual a zero. Por outro lado, a hipótese alternativa dá conta de que o parâmetro é diferente de zero, ou seja, apresenta significado estatístico.

À semelhança dos restantes testes estatísticos, neste teste, o TV é comparado com o valor crítico e é, ainda, possível calcular o valor de prova. Uma vez que tais valores foram calculados pelo R-Project, será dada mais atenção ao respetivo valor de prova, já que este permite aferir diretamente a aceitação ou rejeição da hipótese nula.

Analisando os dados da tabela, conclui-se que o parâmetro  $b_0$  (linha de base) não apresenta significado estatístico, uma vez que o valor de prova (0.143) é superior a 0.05, valor limite acima

do qual a hipótese nula se considera como aceite. Por outro lado, os parâmetros  $b_1$  e  $b_2$  apresentam valor de prova nulo, pelo que a hipótese nula é rejeitada, sendo estes parâmetros fundamentais na definição do ajuste gaussiano do comportamento da cor da telha.

Com o grau de conformidade das telhas obtidas em cada um dos dias, foi possível avaliar a homogeneidade das variâncias ao longo dos 3 dias, através do teste de *Cochran*. Para o possível *outlier* máximo, o valor do teste foi 0.335 e para o limite mínimo, o TV resultante foi 0.558. Ambos os valores estiveram abaixo do valor crítico (0.561), o que mostrou a existência de homogeneidade da variância, tornando-se possível avançar com a análise de variâncias (ANOVA).

Nesta análise ANOVA, o valor de prova foi de 0.906, o que significa que não existem diferenças entre os *matches* nos diferentes dias, sendo possível obter uma estimativa global do grau de conformidade de cada uma das telhas (Tabela 4.16).

Tabela 4.16: Estimativa global da conformidade de cor de cada uma das telhas e comparação com a classificação do painel avaliador.

	<b>Class.</b>	<b>Match 1 (%)</b>	<b>Match 2 (%)</b>	<b>Match 3 (%)</b>	<b>Média (%)</b>
<b>A</b>	2.85	48.3	58.2	61.9	56.1
<b>B</b>	1.00	7.9	8.1	6.7	7.6
<b>C</b>	3.03	68.9	75.6	83.2	75.9
<b>E</b>	2.88	65.3	74.3	70.2	69.9
<b>F</b>	2.98	71.3	80.4	87.3	79.7
<b>G</b>	2.86	59.5	64.3	63.3	62.4
<b>H</b>	5.00	0.5	1.7	0.7	1.0

Dos resultados da tabela anterior fica-se com a noção de que existe uma boa concordância entre a avaliação efetuada pelo painel avaliador e o *match* cromático obtido por processamento digital de imagem, uma vez que as telhas classificadas com valores mais próximos de 3.00 correspondem a maiores índices de concordância cromática (*match*(%)).

## 4.6 Coerência da cor obtida por simulação

Para determinar o limite de aceitabilidade da cor, foram realizadas 1000 simulações de variação de cor do padrão. As imagens simuladas resultaram na variação dos índices R, G e B originais do padrão, recorrendo ao algoritmo presente no anexo B.4. A figura 4.13 exemplifica o aspeto das imagens resultantes no final de uma simulação: a zona delimitada a negro é a imagem simulada e a parte exterior é a imagem original.

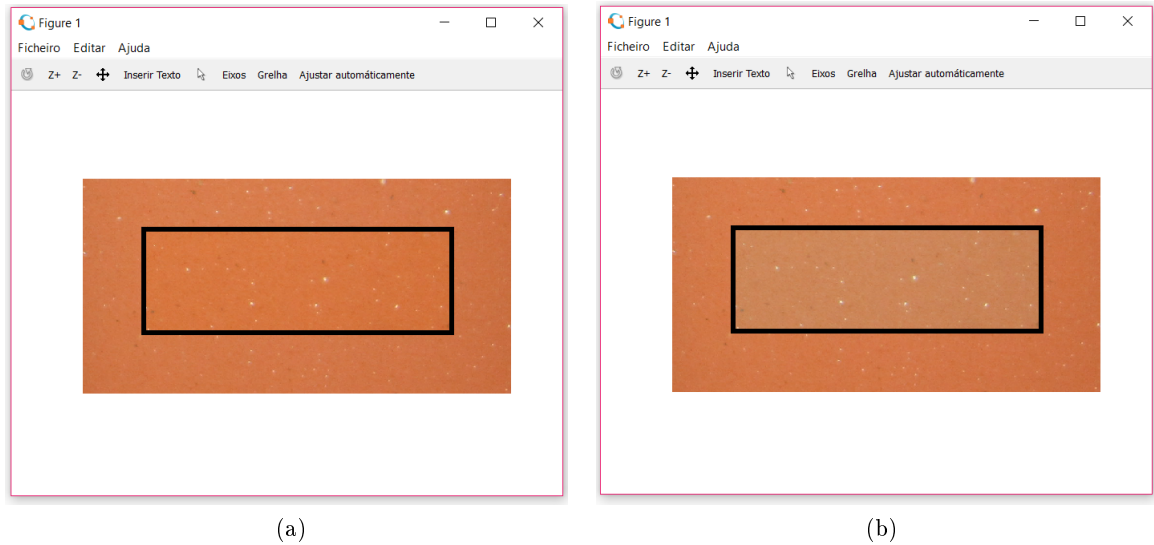


Figura 4.13: Exemplo de uma simulação cuja imagem resultante é (a) conforme e (b) não conforme.

Das 1000 simulações resultaram 103 imagens conformes e 897 não conformes. Com base nos resultados obtidos, foi possível traçar os histogramas de conformidade e de não conformidade, representados na figura 4.14.

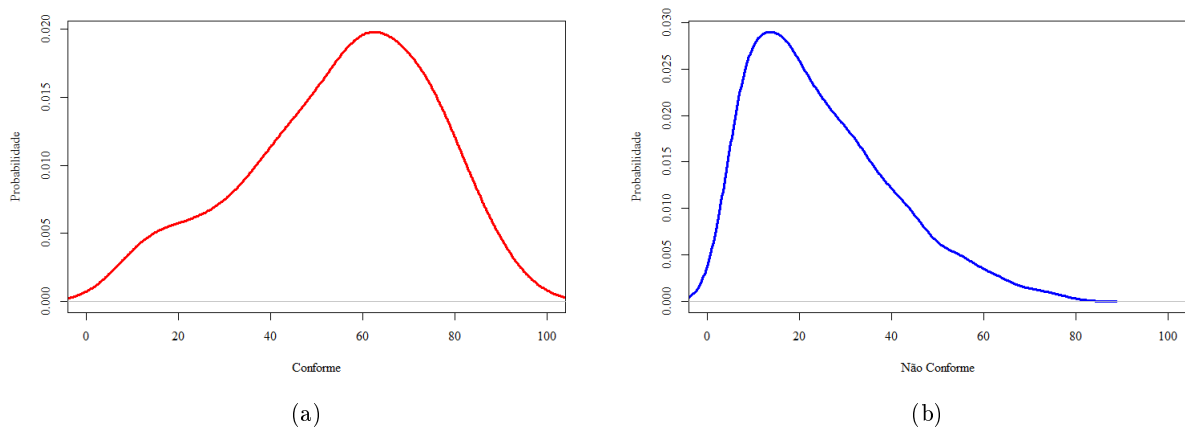


Figura 4.14: Distribuição dos valores relativos a (a) conformidades e (b) não conformidades.

Para determinar o limite de aceitabilidade da cor, foram impostos diversos limites de *match*, em incrementos de 0.01, segundo o algoritmo descrito no anexo B.5. Deste algoritmo foi possível determinar as probabilidade dos erros de tipo I e II, representadas na figura 4.15.



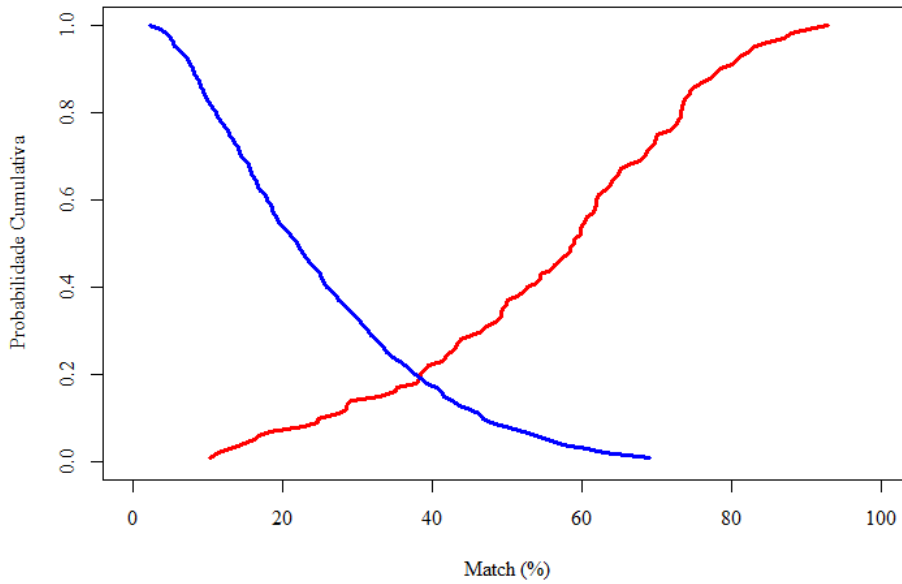


Figura 4.15: Representação gráfica das probabilidades de erro em função do *match* imposto: a vermelho está representada a distribuição cumulativa relativa à conformidade ( $H_0$ ) e a azul a distribuição cumulativa de não conformidade ( $H_1$ ).

Como se pode verificar no gráfico acima, os erros apresentam probabilidades iguais, quando a imposição de um *match* de cerca de 40%. Por uma questão de segurança estatística, este é o valor tido como limiar de aceitabilidade da cor de uma telha UM Lusa Vermelha. Acima deste valor, todas as telhas serão aceites, podendo ser cometido um erro de 20% de falsa aceitação, e abaixo de 40% todas as telhas deverão ser rejeitadas, com 20% de probabilidades de se efetuar uma falsa rejeição.

## 4.7 Avaliação das variações de cor provocadas pelo forno

Para averiguar a influência da posição de cozedura no forno na tonalidade das telhas, foram recolhidas telhas de todas as posições de uma vagona e determinadas as suas temperaturas de cozedura (através de anéis de temperatura).

As telhas foram fotografadas e as suas imagens foram processadas e comparadas com o padrão. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.17.

Tabela 4.17: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) de cozedura das telhas nas diferentes posições do forno e resultado da comparação com o padrão (*Match (%)*).

Pos.	Temp.	Match	Pos.	Temp.	Match	Pos.	Temp.	Match	Pos.	Temp.	Match
G4	1039	59.0	G8	1042	80.5	G12	1044	82.6	G16	1042	65.1
G3	1047	84.2	G7	1047	77.3	G11	1054	78.2	G15	1054	85.8
G2	1047	70.5	G6	1058	73.3	G10	1054	71.5	G14	1054	73.6
G1	1047	64.8	G5	1058	86.2	G9	1059	51.4	G13	1061	87.8

Para facilitar a visualização dos resultados, foram traçados gráficos de temperatura em função da posição (Figura 4.16a) e temperatura em função do *match* (Figura 4.16b).

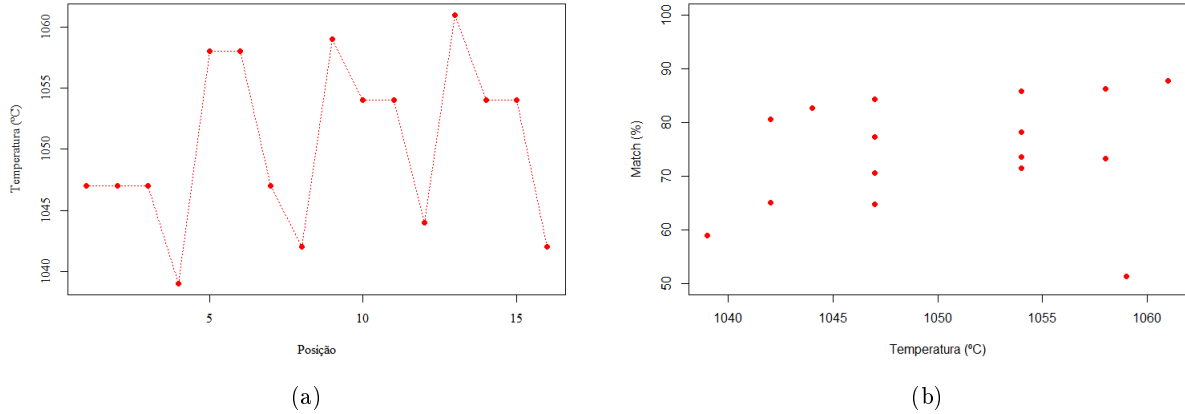


Figura 4.16: Representação gráfica de (a) temperatura obtida em função da posição da telha na vagona; (b) *match* telha-padrão em função da sua temperatura de cozedura.

No gráfico 4.16a parece haver algum tipo de comportamento sequencial, dependendo da posição no forno. À medida que se sobe na vagona, a temperatura diminui, ou seja, as posições cimeiras (4, 8, 12 e 16) cozem sempre a uma temperatura inferior que as restantes.

No sentido de avaliar se existe alguma diferença significativa na temperatura média de cozimento em função do ponto amostral da vagona, foi efetuada uma avaliação através da ANOVA.

Na avaliação da uniformidade da dispersão em termos verticais (avaliação das temperaturas ao longo da posição vertical na vagona) e laterais (avaliação entre os extremos esquerdo e direito), o teste de Cochran não permitiu detetar valores extremos anómalos para a variância destes fatores, o que permite utilizar a ANOVA para concluir acerca dos efeitos provocados pelos mesmos.

Considerando apenas o efeito do posicionamento vertical em altura, em que a primeira linha corresponde à parte inferior e a quarta linha corresponde à zona superior da vagona, a ANOVA de fator único detetou heterogeneidade térmica ( $TV = 7.71 > 3.49 = F_{0.05(3,12)}^u$ ;  $p[H_0] = 0.004$ ).

Atendendo ao maior afastamento em relação à média global, foram removidos os valores referentes à quarta linha (topo da vagona). Nesta situação, deixa de se fazer sentir o efeito do fator linha ( $TV = 1.29 < 4.26 = F_{0.05(2,9)}^u$ ;  $p[H_0] = 0.321$ ), indicando que passa a haver homogeneidade térmica, apresentando um valor global de  $1053.3^\circ\text{C}$ .

Passando agora para a análise do efeito do posicionamento horizontal ao longo da largura da vagona, em que a primeira coluna corresponde ao lado esquerdo e a quarta coluna ao lado direito, a ANOVA de fator único não detetou qualquer falta de conformidade ( $TV = 1.19 < 3.49 = F_{0.05(3,12)}^u$ ;  $p[H_0] = 0.353$ ), o que permite concluir que não existem diferenças térmicas significativas.

O efeito combinado da distribuição térmica na vagona, em termos de altura e largura, foi estudado através da ANOVA de duas vias. Esta análise mostrou que existem diferenças devidas aos dois fatores. O efeito do posicionamento vertical apresentou um  $TV = 17.67 > 3.86 = F_{0.05(3,15)}^u$  e um  $p[H_0] = 0.000$ . Do mesmo modo, a dispersão em termos laterais apresentou um

$TV = 6.17 > 3.86 = F_{0.05(3,15)}^u$  e um  $p[H_0] = 0.014$ .

A figura 4.16b mostra que os valores de conformidade obtidos são superiores a 50%. É de lembrar que o limite de conformidade da cor é de 40%, pelo que, neste caso, apesar da variação da temperatura provocar alterações de tonalidade, estas não são significativas ao ponto de desencadear valores baixos de conformidade cromática que possam resultar na rejeição do material fabricado.

## 4.8 Avaliação diária da cor

Para a avaliação da tonalidade da cor ao longo da produção da telha, foram recolhidas 22 telhas ao longo dos meses de fevereiro e abril.

Essas telhas foram fotografadas e comparadas com o padrão, tendo sido obtidos os resultados demonstrados na tabela 4.18.

Tabela 4.18: Resultados do processamento das imagens das telhas recolhidas para controlo diário.

Data	Match R (%)	Match G (%)	Match B (%)	Match Global (%)
01/02/2016	11.9	60.7	82.7	38.6
02/02/2016	64.4	82.9	63.0	69.5
03/02/2016	45.8	80.2	91.1	69.4
05/02/2016	23.9	72.2	84.5	52.6
08/02/2016	20.0	31.1	72.4	35.6
10/02/2016	72.0	81.5	85.5	79.5
11/02/2016	80.3	75.7	87.9	81.1
12/02/2016	52.2	68.9	95.3	70.0
15/02/2016	38.1	78.4	74.8	60.7
17/02/2016	70.9	89.0	88.6	82.4
22/02/2016	40.3	71.7	97.1	65.5
23/02/2016	14.1	59.2	88.5	41.9
06/04/2016	42.9	71.5	87.8	64.6
08/04/2016	61.9	37.8	43.6	46.7
11/04/2016	86.1	69.4	87.2	80.4
12/04/2016	58.8	86.4	79.4	73.9
14/04/2016	56.0	49.5	77.7	60.0
15/04/2016	90.2	79.4	65.5	77.7
18/04/2016	77.1	77.3	55.2	69.0
19/04/2016	89.0	80.9	88.4	86.0
20/04/2016	70.7	97.7	97.2	87.5
26/04/2016	56.8	62.2	88.2	67.8

Para facilitar a análise dos resultados, foi traçada uma carta de controlo com a representação da linha limite de aceitação/rejeição referente ao *match* de 40% (Figura 4.17).

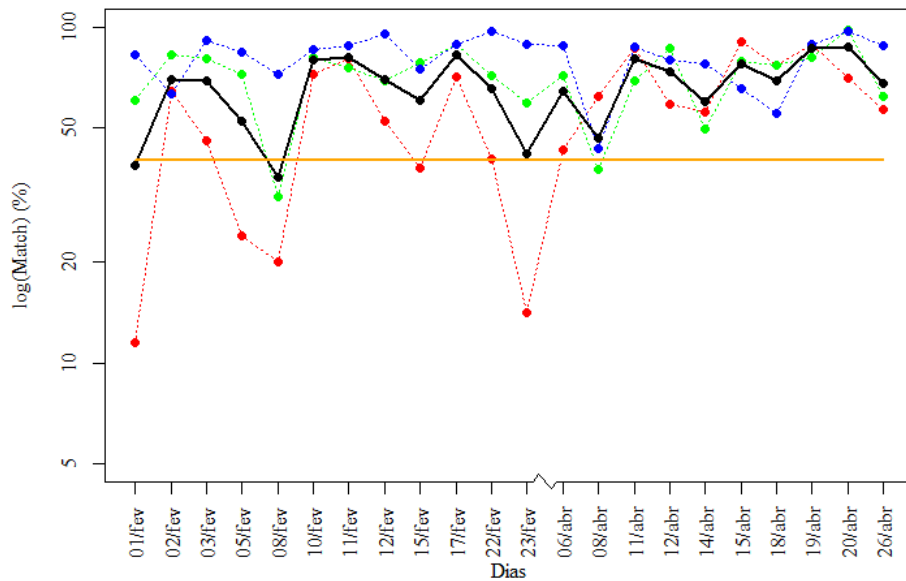


Figura 4.17: Representação gráfica do  $match(\%)$  entre as telhas recolhidas e o padrão, em cada um dos dias. A vermelho, verde e azul estão representadas as componentes cromáticas vermelha, verde e azul da imagem, respetivamente; a preto está representado a  $match$  global; a linha alaranjada representa o limite de aceitabilidade determinado na secção 4.6.

Através da análise do gráfico é possível concluir que, no mês de abril, as variações de tonalidade foram menos acentuadas, estando a tonalidade da telha mais uniforme ao longo dos dias. Para além disso, nestes dois meses, apenas se verificou a presença de duas não conformidades, ambas no início do mês de fevereiro.

A instabilidade da cor durante o mês de fevereiro poderá estar relacionada com anomalias que foram encontradas na pasta preparada, afetando outras características como, por exemplo, as dimensões.

Por outro lado, no final do mês de março, foi aumentado o tempo de cozedura das telhas, o que terá contribuído para que as suas tonalidades se mostrassem mais regulares e similares à do padrão.

## Capítulo 5

# Conclusões

Apesar de, segundo a norma NP EN 1304, serem «admissíveis variações de cor num mesmo lote» e «as variações de cor inerentes ao processo cerâmico propriamente dito» serem aceitáveis, a quantidade de reclamações que chegavam à Umbelino Monteiro, S.A. era uma situação particularmente alarmante.

O trabalho desenvolvido na empresa, entre os meses de outubro de 2015 e junho de 2016, consistiu, assim, na construção de uma ferramenta de processamento de imagem que permitisse, numa primeira fase, averiguar a conformidade da cor das telhas em produção.

Após a realização de diversos ensaios preliminares, foi desenvolvido um sistema de iluminação bem controlado, reproduzível e isolado, capaz de suprimir a interferência da luz exterior na captura de imagem.

Apesar de todos os cuidados tidos no desenvolvimento deste sistema, observou-se que a iluminação utilizada provocava uma heterogeneidade na cor, aquando a aquisição da imagem. Esta discrepância foi contornada através da seleção de uma zona de amostragem com características de iluminação intensa e homogénea (zona central).

Ficou também demonstrado que, através do processamento digital de imagem, é possível determinar a cor de cada uma das telhas padrão. Nesse sentido, foram utilizadas duas abordagens: a do uso de índices de cor (estimativas robustas do valor mais provável, com base na mediana) e a utilização de todo o histograma cromático, sob a forma normalizada. Esta última abordagem, apesar de não indicar objetivamente as coordenadas RGB, parece ser a mais fiável, permitindo a comparação simultânea de todo o perfil de índices de cor, sendo conforme com o critério de qualidade estabelecido pelo painel avaliador.

Atendendo à necessidade de determinar a referência RAL correspondente a cada uma das telhas produzidas, foram comparadas, através da sobreposição de histogramas cromáticos, diversas tonalidades de uma paleta RAL adquirida pela empresa com as telhas consideradas padrão.

Esta determinação de referências foi relativamente fácil em telhas vidradas (conseguiu-se fazer corresponder cada telha a uma referência RAL). No entanto, tal determinação foi mais complicada em telhas que não apresentam corantes na sua constituição, uma vez que as suas cores são obtidas naturalmente (sem aditivos).

Foi também possível comparar a inspeção visual humana com o processamento digital de imagens. Neste ensaio observou-se um valor excessivo de variância associado à classificação obtida por um avaliador. Sendo esta a única situação em que se encontraram desvios, chegou-se

à conclusão de que essa análise foi errónea por parte do avaliador, tendo depois sido corretamente classificada pelo mesmo. Aqui, tornou-se evidente que o Homem pode errar na inspeção da cor de um objeto e a sua opinião pode variar de um dia para o outro.

Quer através de ANOVA quer com a análise de agrupamentos, representada por dendrogramas, foi possível avaliar a similaridade cromática entre objetos. No entanto, essa avaliação apresentou-se ineficaz quando os objetos apresentam pequenas diferenças de tonalidade, mas ainda assim perceptíveis a olho humano.

Deste modo, a avaliação do grau de conformidade das cores através da sobreposição de histogramas cromáticos torna-se a ferramenta mais viável na deteção de anomalias.

Ao representar o grau conformidade cromática das telhas UM Lusa em função da sua classificação, obtida pelo painel avaliador, foi possível observar uma relação gaussiana entre estas duas variáveis. A curva resultante apresenta-se sob a forma de uma função exponencial,

$$f(x) = 69.7 \times e^{-5.7(x-3)^2}$$

Para determinar o limite de aceitabilidade da cor, começou-se por avaliar telhas produzidas ao longo do tempo, sendo estas classificadas ao nível da conformidade pelo painel avaliador. Este método mostrou-se inviável, no sentido em que seria necessário um elevado número de telhas, de modo a ser obtido um valor exato para o limite a ser imposto.

Atendendo à escassez de valores anómalos e à baixa variabilidade cromática observada na produção, decidiu-se enveredar pela simulação computacional de tonalidades. A partir de 1000 simulações, concluiu-se que o limite de aceitabilidade da cor mais favorável seria 40%, percentagem na qual são cometidas 20% de falsas aceitações e falsas rejeições.

Através da análise do fluxograma do processo produtivo da UM, observou-se que a temperatura poderia influenciar a tonalidade das telhas. No entanto, apesar de ser um fator determinante na obtenção de uma boa peça cerâmica, conforme e sem defeitos, esta não afeta diretamente a tonalidade: ocorrem variações mas estas são mínimas, uma vez que a telha continua a ser considerada conforme em relação à cor.

Para avaliar a possibilidade desta ferramenta ser utilizada no controlo da produção, foi ainda avaliado o comportamento da tonalidade ao longo de dois meses de produção de telha UM Lusa Vermelha. Este controlo mostrou-se eficaz, na medida em que conseguiu detetar algumas anomalias de tonalidade.

Concluindo, esta ferramenta permite tratar o objetivo deste trabalho, ou seja, permite avaliar a conformidade da cor ao longo do tempo, mantendo o seu modo de avaliação fiável e coerente por períodos longos (2 meses).

Após a sua implementação automatizada na linha de produção, esta ferramenta consegue ser mais eficaz na deteção de anomalias do que o Homem, apresentando resultados coerentes ao longo do tempo, independentes da iluminação externa e rápidos, diminuindo o tempo de atenção, por parte dos colaboradores, necessário à avaliação da tonalidade.

Para além disso, para a construção desta ferramenta, não são necessários custos muito avultados, uma vez que todo o material utilizado pode ser adquirido facilmente e, na maioria dos casos, faz parte do quotidiano de qualquer pessoa. Numa altura em que a economia está em baixo e as despesas são um fator determinante numa empresa, tal facto permite a poupança de

recursos monetários por parte da mesma.

*«Num ambiente cada vez mais dinâmico e complexo, satisfazer continuamente os requisitos e ter em consideração as necessidades e expectativas futuras constitui um desafio para as organizações. Para atingir este objetivo, a organização poderá considerar necessário adotar diversas formas de melhoria para além da correção e da melhoria contínua, tais como mudança disruptiva, inovação e reorganização.»*

NP EN ISO 9001:2015

Por ser um projeto que requereu bastante atenção, paciência, minuciosidade, empenho e determinação, este resultou num trabalho gratificante e ambicioso, que pôs à prova diversos conhecimentos e conceitos adquiridos ao longo do percurso académico.

# Bibliografia

- [1] Ralph E. Grim. *Applied Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, 1962.
- [2] Michel Kornmann. *Clay bricks and rooftiles, manufacturing and properties*. Société de l'industrie minérale, 2007.
- [3] Janiara Ferreira de Araújo. A influência da adição de caulim, quartzo e feldspato potássico na formulação de massas cerâmicas para telhas: modelo estatístico. Tese de Mestrado, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- [4] Maria Luísa de Oliveira Gama Caldas. História da telha. , Faculdade de Arquitectura de Lisboa, 2006/2007.
- [5] Jorge M. Branco. Coberturas em telhas cerâmicas. , Univerisdade do Minho, 2012.
- [6] Margon Portugal. *História da Telha* [<http://margonportugal.blogspot.pt/2007/03/histria-da-telha.html>], (último acesso a 17 de março de 2016).
- [7] Pedro Lourenço. Cobertura com telha cerâmica, uma solução construtiva sustentável. , Umbelino Monteiro, S.A., 2012.
- [8] Elisabete Maria Fonseca Correia. Custo da qualidade nas pequenas e médias empresas portuguesas. *KÉRAMICA*, 275:59–62, 2005.
- [9] Maria do Rosário da Silva Almeida. Validação de um método analítico: Determinação de fósforo total. Tese de Mestrado, Departamento de Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.
- [10] Joseph M. Juran e A. Blanton Godfrey. *Juran's Quality Handbook*. McGraw-Hill, 1998.
- [11] Instituto Português da Qualidade. Requisitos dos sistemas de gestão da qualidade (iso 9001:2015). , 2015.
- [12] Diogo Faria. Análise e processamento de imagem. , 2010.
- [13] Rafael C. Gonzalez e Richard E. Woods. *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Inc., 2002.
- [14] Willians Cerozzi Balan. A imagem digital. , 2009.
- [15] Cládia Dell'Agnolo. *Técnicas de Análise de Imagens para o Controlo de Qualidade e Inspeção de Produtos Industriais* [<http://www.inf.ufsc.br/visao/qualidade.html>], 2001 (último acesso a 8 de fevereiro de 2016).



- 
- [16] Marcelino Fernández Abajo. *Manual sobre fabricación de baldosas, tejas y ladrillos*. Terrassa: Beralmar, 2000.
- [17] Maria Helena Pires César Canotilho. *Processos de cozedura em cerâmica*. Instituto Politécnico de Bragança, 1999.
- [18] A. E. Souza, S. R. Teixeira, G. T. A. Santos, e E. Longo. Addition of sedimentary rock to kaolinitic clays: influence on sintering process. *Cerâmica*, 59:147–155, 2013.
- [19] Skoog, Holler, e Crouch. *Principles of Instrumental Analysis*. Cengage Learning, 2006.
- [20] Alasdair McAndrew. An introduction to digital image processing with matlab. , Victoria University of Technology.
- [21] Maria Inês Henriques. Colour measurement. Tese de Mestrado, Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2008.
- [22] Dr. Mehdi Khan. Corantes cerâmicos: Métodos de ensaio e aplicações. *KÉRAMICA*, 235:10–20, 1999.
- [23] Maria Margarida Ramalho R. Costa e Maria José B. Marques de Almeida. *Fundamentos de Física*. Livraria Almedina, 2004.
- [24] José Eustáquio Rangel de Queiroz e Herman Martins Gomes. Introdução ao processamento digital de imagens.
- [25] Kit L. Yam e Spyridon E. Papadakis. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61:137–142, 2004.
- [26] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, e Steven L. Eddins. *Digital Image Processing Using MATLAB*. Gatesmark Publishing, 2009.
- [27] Mário J. L. Caetano. *Sistema RAL de Codificação de Cores* [<http://ctborracha.com>], (último acesso a 8 de junho de 2016).
- [28] RAL Color. *Classic RAL System* [<http://www.ralcolor.com>], (último acesso a 13 de junho de 2016).
- [29] César Calizaya. *La imagen digital* [<http://www.youtube.com/watch?v=WvBEUEIFAp8>], 2012 (último acesso a 12 de fevereiro de 2016).
- [30] André Mendes. *Processamento de imagens - Introdução à Amostragem e Quantização* [<http://www.youtube.com/watch?v=T6TLkG0xN3g>], 2013 (último acesso a 12 de fevereiro de 2016).
- [31] Dr. Tim Morris. Image processing with matlab. , The University of Manchester, 2012.
- [32] Vilbett Briones e José M. Aguilera. Image analysis of changes in surface color of chocolate. *Food Research International*, 38:87–94, 2005.

- [33] Sidnei Paciornik, Allegra V. Yallouz, Reinaldo C. Campos, e Dani Gannerman. Scanner image analysis in the quantification of mercury using spot-tests. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 17:156–161, 2006.
- [34] Majid Rashidi, Keyvan Seyfi, e Mohammad Gholami. Determination of kiwifruit volume using image processing. *ARPJ Journal of Agricultural and Biological Science*, 2:17–22, 2007.
- [35] A. Khandual A. Luximon, N. Rout, T. Grover, e I.M.Kandi. Evaluation of fibre migration angle by image processing using economic usb camera and matlab: Demonstrated example. *Materials Today: Proceedings*, 2:2463–2471, 2015.
- [36] Wellington Silva Lyra, Vagner Bezerra dos Santos, Amália Geiza Gama Dionízio, Valdomiro Lacerda Martins, Luciano Farias Almeida, Edvaldo Nóbrega Gai ao, Paulo Henrique Gonçalves Dias Diniz, Edvan Cirino Silva, e Mário César Ugulino Araújo. Digital image-based flame emission spectrometry. *Talanta*, 77:1584–1589, 2009.
- [37] Angel Lopez-Moliner, David Li nan, Daniel Sipiera, e Raquel Falcon. Chemometric interpretation of digital image colorimetry. application for titanium determination in plastics. *Microchemical Journal*, 96:380–385, 2010.
- [38] Adamastor Rodrigues Tôrres, Wellington da Silva Lyra, Stéfani Iury Evangelista de Andrade, Renato Allan Navarro Andrade, Edvan Cirino da Silva, Mário César Ugulino Araújo, e Edvaldo da Nóbrega Gaião. A digital image-based method for determining of total acidity in red wines using acid-base titration without indicator. *Talanta*, 84:601–606, 2011.
- [39] Raphael Linker, Oded Cohen, e Amos Naor. Determination of the number of green apples in rgb images recorded in orchards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81:45–57, 2012.
- [40] Alessandro Ulrici, Giorgia Foca, Maria Cristina Ielo, Luisa Antonella Volpelli, e Domenico Pietro Lo Fiego. Automated identification and visualization of food defects using rgb imaging: Application to the detection of red skin defect of raw hams. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16:417–426, 2012.
- [41] Aree Choodum, Proespichaya Kanatharana, Worawit Wongniramaikul, e Niamh Nic Daeid. Using the iphone as a device for a rapid quantitative analysis of trinitrotoluene in soil. *Talanta*, 115:143–149, 2013.
- [42] A. Manickavasagan, N. K. Al-Mezeini, e H. N. Al-Shekaili. Rgb color imaging technique for grading os dates. *Scientia Horticulturae*, 175:87–94, 2014.
- [43] Walid A. Makled e Sameh S. Tahoun. Digital quantification of the miospore coloration to assess the thermal maturity: Novel rgb-based measuring technique. *Marine and Petroleum Geology*, 67:1–15, 2015.
- [44] Malay Kishore Dutta, Namita Sengar, Narayan Kamble, Kaushik Banerjee, Navroj Minhas, e Biplab Sarkar. Image processing based technique for classification of fish quality after cypermethrine exposure. *LWT-Food Science and Technology*, 68:408–417, 2016.

- [45] Joao Gilberto Ramos Abreu, Nádia Andrade Abreu, e Sónia Vieira da Silva. Ferramentas da qualidade. , 2008.
- [46] Estêvão Andrade, Maria da Luz Abreu, Teodoto Silva, e Vitalina Cunha. Ferramentas da qualidade. , 2008.
- [47] Lorena Vicini. Análise multivariada da teoria à prática. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil, 2005.
- [48] T. F. G. G. Cova, J. L. G. F. S. C. Pereira, e A. A. C. C. Pais. Is standard multivariate analysis sufficient in clinical and epidemiological studies? *Journal of Biomedical Informatics*, 46:75–86, 2013.
- [49] Tânia Firmino G. G. Cova. Aplicações em quimiometria: Do diagnóstico médico à cionometria. Tese de Mestrado, Departamento de Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.
- [50] Joseph F. Hair, William C. Black, Barry J. Babin, e Rolph E. Anderson. *Multivariate Data Analysis*. Pearson, 2009.

# Apêndice A

## Tabelas Estatísticas

Tabela A.1: Valores críticos para o teste de *Grubbs* ( $\alpha = 0.05$ ) [ISO 17025, ASTM E-178].

<i>n</i>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<i>G</i>	1.15	1.48	1.71	1.89	2.02	2.13	2.21	2.29	2.34
<i>n</i>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
<i>G</i>	2.41	2.46	2.51	2.55	2.54	2.62	2.65	2.68	2.71
<i>n</i>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<i>G</i>	2.73	2.76	2.78	2.80	2.82	2.91	2.98	3.04	3.13
<i>n</i>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>110</b>	<b>120</b>	<b>130</b>	<b>140</b>
<i>G</i>	3.20	3.26	3.31	3.35	3.38	3.42	3.44	3.47	3.49

Tabela A.2: Valores críticos da distribuição *t-Student* bilateral.

$\nu$	$\alpha$				$\nu$	$\alpha$				$\nu$	$\alpha$			
	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>		<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>		<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>
<b>2</b>	2.92	4.30	6.96	9.92	<b>12</b>	1.78	2.18	2.68	3.05	<b>24</b>	1.71	2.06	2.49	2.80
<b>3</b>	2.35	3.18	4.54	5.84	<b>13</b>	1.77	2.16	2.65	3.01	<b>26</b>	1.71	2.06	2.48	2.78
<b>4</b>	2.13	2.78	3.75	4.60	<b>14</b>	1.76	2.14	2.65	2.98	<b>30</b>	1.70	2.04	2.46	2.75
<b>5</b>	2.02	2.57	3.36	4.03	<b>15</b>	1.75	2.13	2.60	2.95	<b>35</b>	1.69	2.03	2.44	2.72
<b>6</b>	1.94	2.45	3.14	3.71	<b>16</b>	1.75	2.12	2.58	2.92	<b>40</b>	1.68	2.02	2.42	2.70
<b>7</b>	1.89	2.36	3.00	3.50	<b>17</b>	1.74	2.11	2.57	2.90	<b>50</b>	1.68	2.01	2.40	2.68
<b>8</b>	1.86	2.31	2.90	3.36	<b>18</b>	1.73	2.10	2.55	2.88	<b>60</b>	1.67	2.00	2.39	2.66
<b>9</b>	1.83	2.26	2.82	3.25	<b>19</b>	1.73	2.09	2.54	2.86	<b>80</b>	1.66	1.99	2.37	2.64
<b>10</b>	1.81	2.23	2.76	3.17	<b>20</b>	1.72	2.09	2.53	2.85	<b>100</b>	1.66	1.98	2.36	2.63
<b>11</b>	1.80	2.20	2.72	3.11	<b>22</b>	1.72	2.07	2.51	2.82	$\infty$	1.64	1.96	2.33	2.58

Tabela A.3: Valores críticos para o teste de Cochran referente à homogeneidade da variância ( $\alpha = 0.05$ ).

$n$	$m = \text{número de réplicas da estimativa de cada variância}$							
	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	$\infty$
<b>2</b>	0.9985	0.9750	0.9392	0.9057	0.8772	0.8534	0.8010	0.5000
<b>3</b>	0.9969	0.8709	0.7977	0.7457	0.7071	0.6771	0.6167	0.3333
<b>4</b>	0.9065	0.7679	0.6841	0.6287	0.6287	0.5598	0.5017	0.2500
<b>5</b>	0.8412	0.6838	0.5981	0.5441	0.5441	0.4783	0.4214	0.2000
<b>6</b>	0.7808	0.6161	0.5321	0.4803	0.4803	0.4184	0.3682	0.1667
<b>7</b>	0.7271	0.5612	0.4800	0.4307	0.4307	0.3726	0.3259	0.1429
<b>10</b>	0.6020	0.4450	0.3733	0.3311	0.3311	0.2823	0.2439	0.1000
<b>20</b>	0.3894	0.2705	0.2205	0.1921	0.1921	0.1602	0.1357	0.0500
<b>30</b>	0.2929	0.1980	0.1593	0.1377	0.1377	0.1137	0.0958	0.0333
<b>40</b>	0.2370	0.1576	0.1259	0.1082	0.1082	0.0887	0.0745	0.0250
<b>60</b>	0.1737	0.1131	0.0895	0.0765	0.0765	0.0623	0.0520	0.016

## Apêndice B

# Algoritmos

---

**Algoritmo B.1** Algoritmo para a correção da iluminação.

---

```
function [Cbk,Cwt]=jimrect (x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,img)
xbi=min(x1,x2);xbf=max(x1,x2);ybi=min(y1,y2);ybf=max(y1,y2);Cbk=[xbi ybi xbf ybf];
xwi=min(x3,x4);xwf=max(x3,x4);ywi=min(y3,y4);ywf=max(y3,y4);Cwt=[xwi ywi xwf ywf];
%Quantificação da camada BLACK
Rb=img(ybi:ybf,xbi:xbf,1);Gb=img(ybi:ybf,xbi:xbf,2);Bb=img(ybi:ybf,xbi:xbf,3);
[nl,nc]=size(Rb);np=nl*nc;Rb=reshape(Rb,np,1);Gb=reshape(Gb,np,1);Bb=reshape(Bb,np,1);
Rcb=prctile(Rb,xb);Gcb=prctile(Gb,xb);Bcb=prctile(Bb,xb);
% Quantificação da camada WHITE
Rw=img(ywi:ywf,xwi:xwf,1);Gw=img(ywi:ywf,xwi:xwf,2);Bw=img(ywi:ywf,xwi:xwf,3);
[nl,nc]=size(Rw);np=nl*nc;Rw=reshape(Rw,np,1);Gw=reshape(Gw,np,1);Bw=reshape(Bw,np,1);
Rcw=prctile(Rw,xw);Gcw=prctile(Gw,xb);Bcw=prctile(Bw,xb);
Rs=255/(Rcw-Rcb);Gs=255/(Gcw-Gcb);Bs=255/(Bcw-Bcb);
Disp=[Rcb Gcb Bcb ; Rcw Gcw Bcw ; Rs Gs Bs]
[nl,nc,np]=size(img);
R=img(1:nl,1:nc,1);G=img(1:nl,1:nc,2);B=img(1:nl,1:nc,3);
R0=ones(nl,nc);G0=R0;B0=R0;R0=R0*Rcb;G0=G0*Gcb;B0=B0*Bcb;
R=R-R0;G=G-G0;B=B-B0;
R=R*Rs;G=G*Gs;B=B*Bs;
size(R);
imrect(1:nl,1:nc,1)=R;imrect(1:nl,1:nc,2)=G;imrect(1:nl,1:nc,3)=B;
imwrite(imrect,'res_jimrect.jpg')
return
```

---

---

**Algoritmo B.2** Algoritmo para o cálculo do *match* entre o padrão e uma amostra.

---

```

function [match]=jmatch (x1,y1,x2,y2,img1,x3,y3,x4,y4,img2)
xi1=min(x1,x2);xf1=max(x1,x2);yi1=min(y1,y2);yf1=max(y1,y2);X1=[xi1 yi1 xf1 yf1];
xi2=min(x3,x4);xf2=max(x3,x4);yi2=min(y3,y4);yf2=max(y3,y4);X2=[xi2 yi2 xf2 yf2];
R1=img1(yi1:yf1,xi1:xf1,1);G1=img1(yi1:yf1,xi1:xf1,2);B1=img1(yi1:yf1,xi1:xf1,3);
R2=img2(yi2:yf2,xi2:xf2,1);G2=img2(yi2:yf2,xi2:xf2,2);B2=img2(yi2:yf2,xi2:xf2,3);
%Processar 1ª imagem
R=R1;G=G1;B=B1;
[nl,nc]=size(R);np=nl*nc;
R=reshape(R,np,1);sort(R);int16(R+1);iR(1:256)=0;
G=reshape(G,np,1);sort(G);int16(G+1);iG(1:256)=0;
B=reshape(B,np,1);sort(B);int16(B+1);iB(1:256)=0;
for i=1:np
if R(i)<1 R(i)=1;endif;if G(i)<1 G(i)=1;endif;if B(i)<1 B(i)=1;endif;
iR(R(i))=iR(R(i))+1;
iG(G(i))=iG(G(i))+1;
iB(B(i))=iB(B(i))+1;
endfor
iR=iR';iG=iG';iB=iB';
sR=sum(iR)./100;sG=sum(iG)./100;sB=sum(iB)./100;
pR1=iR/sR;pG1=iG/sG;pB1=iB/sB;
%Processar 2ª imagem
R=R2;G=G2;B=B2;
[nl,nc]=size(R);np=nl*nc;
R=reshape(R,np,1);sort(R);int16(R+1);iR(1:256)=0;
G=reshape(G,np,1);sort(G);int16(G+1);iG(1:256)=0;
B=reshape(B,np,1);sort(B);int16(B+1);iB(1:256)=0;
for i=1:np
if R(i)<1 R(i)=1;endif;if G(i)<1 G(i)=1;endif;if B(i)<1 B(i)=1;endif;
iR(R(i))=iR(R(i))+1;
iG(G(i))=iG(G(i))+1;
iB(B(i))=iB(B(i))+1;
endfor
sR=sum(iR)./100;sG=sum(iG)./100;sB=sum(iB)./100;
pR2=iR/sR;pG2=iG/sG;pB2=iB/sB;
%Match entre pdf1 e pdf2
for i=1:256
mR(i)=min(pR1(i),pR2(i));
mG(i)=min(pG1(i),pG2(i));
mB(i)=min(pB1(i),pB2(i));
endfor
mR=mR';mG=mG';mB=mB';
X=0:255;X=X';
match=[X pR1 pR2 mR pG1 pG2 mG pB1 pB2 mB];
pmR=sum(mR);pmG=sum(mG);pmB=sum(mB);
pmSim=(pmR*pmG*pmB).^(1/3);
pmatch=[pmR pmG pmB pmSim]
return

```

---

**Algoritmo B.3** Algoritmo para o cálculo das coordenadas RGB de uma amostra.

```
function [X,Disp]=jimcalc(x1,y1,x2,y2,img)
xi=min(x1,x2);xf=max(x1,x2);yi=min(y1,y2);yf=max(y1,y2);X=[xi yi xf yf];
R=img(yi:yf,xi:xf,1);
G=img(yi:yf,xi:xf,2);
B=img(yi:yf,xi:xf,3);
[nl,nc]=size(R);np=nl*nc;
R=reshape(R,np,1);G=reshape(G,np,1);B=reshape(B,np,1);
Ar(1)=prctile(R,50);Ar(2)=prctile(G,50);Ar(3)=prctile(B,50);
IC(1)=prctile(R,15.86);IC(2)=prctile(R,84.14);
s(1)=(IC(2)-IC(1))/2;RSE(1)=100*s(1)/Ar(1);
IC(3)=prctile(G,15.86);IC(4)=prctile(G,84.14);
s(2)=(IC(4)-IC(3))/2;RSE(2)=100*s(2)/Ar(2);
IC(5)=prctile(B,15.86);IC(6)=prctile(B,84.14);
s(3)=(IC(6)-IC(5))/2;RSE(3)=100*s(3)/Ar(3);
Res=[Ar(1:3) IC(1:6)];
Disp=[Ar(1) s(1) RSE(1) IC(1:2);Ar(2) s(2) RSE(2) IC(3:4);Ar(3) s(3) RSE(3) IC(5:6)];
return
```

**Algoritmo B.4** Algoritmo para a simulação das variações de cor a partir de uma imagem padrão.

```
im0=imread('Padrao.jpg');
img=im0(1990:2430,2740:3615,1:3);imshow(img);it=img;
im1=img;im0=im1(110:310,130:750,1:3);
im1(100:320,120:760,1:3);imshow(im1)
imBlack=im1;
im2=img(110:310,130:750,1:3);imshow(im2)
R=im2(:,1);G=im2(:,2);B=im2(:,3);
for i=1:1000
input("Pressione ENTER para continuar...")
imshow(imBlack);pause(1)
r=10*randn;g=10*randn;b=10*randn;
rr=R.-r;rg=G.-g;rb=B.-b;imt(:,1)=rr;
imt(:,2)=rg;imt(:,3)=rb;
im1(110:310,130:750,1)=rr;im1(110:310,130:750,2)=rg;im1(110:310,130:750,3)=rb;
imshow(im1);[match]=jimat ch(imt,im0);
Report(i,1:7)=[r g b match];
endfor
```

**Algoritmo B.5** Algoritmo para a determinação das probabilidades dos erros de tipo I e II.

```
load x.dat;load y.dat
for i=1:100
z(i)=0.00+i/100;
a(i)=quantile(x(:,7),z(i));
b(i)=quantile(y(:,7),1-z(i));
endfor
z=z';a=a';b=b';
Report=[z a b];
```